



TAMPEREEN TEKILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANTTI EERIKÄINEN
TELAMAALAUKSEN KEHITYS JATKUVATOIMISELLA MAALAUUS-
LINJALLA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Petri Vuoristo
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 3. Helmikuuta
2016

TIIVISTELMÄ

Antti Eerikäinen: Telamaalauksen kehitys jatkuvatoimisella maalauslinjalla
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 63 sivua
Helmikuu 2016
Materiaalitekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Keraamit ja pinnoitustekniikka
Tarkastaja: professori Petri Vuoristo

Avainsanat: kolmitelamaalaus, maalipinnoite, Pitkittäissuuntainen raita, poikittaissuuntainen raita, pintajännitys

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tiedon ja osaamisen parantaminen kolmitelamaalauksen suhteen SSAB:n Hämeenlinnan maalipinnoitustehtaalla. Perusteina tälle diplomityölle olivat: maalauksen laadun parantaminen telamaalaukskoneella, maalaustapah-tuman hallinnan parantaminen ja tehokkuuden parantaminen kustannussäästön kautta. Diplomityön aihe rajattiin käsittelemään erityisesti telamaalausta ja siihen liittyviä ilmi-öitä sekä maalien ominaisuuksia.

SSAB:n Hämeenlinnan ohutlevytehtaan kylmävalssattuja ja metallipinnoitettuja tuotteita jatkojalostetaan maalipinnoituslinjalla maalaamalla ne liuotinpohjaisia polyesteri-, PVdF- ja polyuretaanipohjaisia maaleja käyttämällä. Maalit levitetään teräsnauhan pin-nalle käyttämällä kolmitelamaalaukskonetta, joka koostuu karkeasti kovakromatusta nos-totelasta, polymeeripintaisista mitta- ja maalaustelasta.

Tässä diplomityössä keskityttiin maalauksessa syntyviin virheisiin: pitkittäiseen ja poi-kittaiseen raitaan. Pitkittäisen raidan syntymisen syy on huonosti valituissa telanopeuk-sissa ja liian korkeassa maalin kapillaariluvussa. Kirjallisuusaineiston perusteella voi-daan todeta, että telanopeuksien vääränlainen asettaminen aiheuttaa maalin aaltoilua teloilla, mistä muodostuu pitkittäistä raitaa. Oikeiden telanopeuksien ja maalin kapillaariluvun pienentäminen vähentäisivät pitkittäistä raitaa.

Poikittaisen raidan syntyminen johtuu meninskin kulkeutumisesta liian syvälle telanip-piin, mikä taas johtuu väärin asetetuista telanopeuksista ja maalin korkeasta kapillaari-luvusta. Telanipissä meninskiin sekoittuu ilmaa, joka ilmenee teräsnauhan pinnalla poi-kittaisena raitana. Kapillaariluvun alentaminen ja oikein asetetut telanopeudet pienentä-vät poikittaisen raidan syntymisen mahdollisuutta.

Edellisten tutkimusten tuloksien vahvistamiseksi tähän diplomityöhön suoritettiin koe-ajo. Ominaisuuksiltaan muokatulla polyesterimaalilla maalattiin suunnitellun koeajo-syklin mukaisesti. Koeajositykli suunniteltiin siten, että se käy läpi tällä hetkellä käytössä olevat telanopeusasetukset. Koeajon perusteella voidaan sanoa, että aikaisemmissa tut-kimuksissa esitetyt teoriat ja keinot auttavat vähentämään poikkiraidan syntymistä ja tuottamaan virheettömän maalipinnan.

ABSTRACT

Antti Eerikäinen: Development of reverse roll coating process in continuous coil coating line

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 63 pages

February 2016

Master's Degree Programme in Material Technology

Major: Ceramics and Coating technology

Examiner: Professor Petri Vuoristo

Keywords: coil coating, reverse roll coating, ribbing, cascade, surface tension

The aim of this master's thesis was to improve understanding and methods at SSAB's continuous coil coating line in Hämeenlinna. Improvement of painting process at roll coating unit, improvement of the control of the painting process and overall efficiency improvement were the main reasons why master's thesis was conducted. The focus of the master's thesis was the in three roll reverse roll coating and phenomena related to that and also in the paint properties.

The SSAB Hämeenlinna mill is a producer of cold rolled and metal coated thin sheet metal, which is coated in the coil coating line with solvent-based paints. The solvent-based paints are mainly based on polyester, PVdF and polyurethane resins. Paints are applied in coil coating line by using reverse roll coater which is a three roll system with tray feed. Painting and metering roll is polymer coated and pick-up roll is hard chrome plated.

In this master's thesis is introduced two types of stripe phenomena: cascade and ribbing. Ribbing defect forming on to painted thin sheet lies in inappropriately chosen roll speeds and too high capillary number (Ca). Based on previous studies can be acknowledged that incorrect roll speeds will create waves, which forms the ribbing defect. When roll speeds are set correctly and paint's capillary number is optimal, ribbing defect can't be formed.

The Cascade defect is stripe-like defect in traverse on the painted metal strip, so quite contrary to longitudinal ribbing defect. Cascade is formed when meniscus will travel too far between the rolls due to incorrectly set roll speeds and too high capillary number. When meniscus is too far between the rolls, it tends to get mixed with air, which leads to cascade defect occurring on painted surface. Reducing the capillary number by modifying paint properties and setting roll speeds correctly would lower the tendency of cascade defect.

To confirm, what was shown in previous studies, a line trial was conducted as a part of this master's thesis. The line trial was designed to be done with modified polyester paints and ran through a specified trial cycle. The cycle was based on the currently used roll speed combination and it tested the paint behavior in those. As a result of the line trial the findings of the previous studies were confirmed and modification of the paint property combined to right set of roll speeds produced successfully a defect-free painted surface.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty SSAB:lle Hämeenlinnan maalipinnoituslinjan prosessikehitysosastolle. Aikaisempien vuosien kesätyötehtävät tukivat ja mahdollistivat telamaalausta käsittelevän diplomityön.

Haluan osoittaa suuren kiitoksen diplomityöni ohjaajalle Development Engineer Jouni Ahokkaalle, joka auttoi, neuvoi ja ohjasi minua tämän himmelin äärellä. Suuri kiitos myös SSAB:lle ja Development Manager Pasi Köykälle mahdollisuudesta ja luottamuksesta tämän työn suorittamiseen. Kiitos myös muulle prosessikehitystiimille tuesta.

Lämpimät kiitokset ansaitsevat myös yhteistyökumppanimme The Valspar Corporation ja Top Analytica, jotka mahdollistivat omalta osaltaan tämän diplomityön suorittamisen. Kiitokset myös tarkastajana toimivalle professori Petri Vuoristolle.

Lopuksi haluaisin sydämellisesti kiittää perhettäni ja avopuolisoani Maria-Elisa Lempiä, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet minua läpi opiskeluajan ja tämän diplomityön suorittamisen.

Hämeenlinnassa, 29.2.2016

Antti Eerikäinen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SSAB.....	2
2.1	Hämeenlinnan ohutlevytehdas	2
3.	HÄMEENLINNAN MAALIPINNOITUSLINJA.....	4
3.1	Jatkuvatoiminen maalipinnoitusprosessi.....	4
3.2	Tuotannossa olevat maalipinnoitteet.....	7
4.	TELAMAALAUUS.....	10
4.1	Maalaus kone.....	11
4.2	Maalaustapahtuma.....	12
4.3	Teoriat telamaalauksen taustalla	14
4.4	Meninski.....	15
4.5	Telojen ominaisuudet	17
4.6	Telojen säätö	18
4.7	Telamaalauksen virheet.....	19
4.7.1	Pitkittäinen raita	20
4.7.2	Poikittainen raita	22
5.	MAALIEN OMINAISUUDET.....	25
5.1	Maalin komponentit ja valmistus	25
5.1.1	Sideaineet	25
5.1.2	Liuottimet.....	26
5.1.3	Pigmentit	27
5.1.4	Lisäaineet	28
5.2	Viskositeetti.....	28
5.2.1	Leikkauskäyttäytyminen	30
5.2.2	Lämpötilasta riippuva käyttäytyminen.....	33
5.3	Pintajännitys	33
5.4	Kapillaariluku.....	34
5.5	Tasoittuminen.....	36
6.	MITTAUKSET	39
6.1	Maalin ominaisuudet	39
6.1.1	Viskositeetti	39
6.1.2	Pintajännitys.....	44
6.1.3	Kapillaarilukujen laskenta.....	45
7.	KOEAJO	47
7.1	Referenssi	48
7.2	Koeajomaali 1	49
7.3	Koeajomaali 2	51
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITYSEHDOTUKSET.....	53
8.1	Maalaus kone.....	53

8.2	Koeajo	54
8.3	Pitkittäisen raidan syntymisen vähentäminen	54
8.4	Poikittaisen raidan syntymisen vähentäminen	54
8.5	Maalaustapahtuman lämpötilan hallinta.....	55
8.6	Suurnopeuskuvaus.....	56
8.7	FEM ja CFD mallien rakentaminen	57
8.8	Kapillaarilukujen ja telanopeuksien määrittäminen maaleille.....	57
8.9	Sinkki 3 – linjan ChemCoaterin kehitys	57
9.	YHTEENVETO	58
	LÄHTEET	60

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ARS	Abrasion resistant, hankausta kestävä
ATEX	<i>ATmosphères EXplosibles</i> , räjähdysvaarallinen tila
Ca	Capillary number, kapillaariluku
CFD	Computational Fluid Dynamics, tietotekninen virtauslaskenta
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
PAAm	Polyacrilamide, polyakryyliamidi
PVdF	Polyvinyylidifluoridi, kestopuovilaatu
RPM	Kierrosnopeus
SSAB	Svenskt Stål AB, Ruotsissa 1918 perustettu teräksen tuottaja
TiO ₂	Titaanidioksidi

1. JOHDANTO

Tämän diplomityön tarkoituksena on tiedon ja osaamisen parantaminen kolmitelamaalauksen suhteen SSAB:n Hämeenlinnan maalipinnoitustehtaalla. Diplomityö käsittelee SSAB:n Hämeenlinnan tehdasta, maalipinnoitusprosessia ja erityisesti telamaalausta ja siihen liittyviä ilmiöitä.

Perusteina tälle diplomityölle ovat: maalauksen laadun parantaminen telamaalauskooneella, maalaustapahtuman hallinnan parantaminen ja tehokkuuden parantaminen kustannussäästön kautta. Diplomityön aihe on rajattu maalipinnoitusprosessista käsittelemään erityisesti telamaalausta ja siihen liittyviä asioita, kuten esimerkiksi telamaalauskonetta, käytettäviä maaleja ja maalauksen virheitä. Telamaalauskooneella tarkoitetaan pintamaalauskonetta ja käytettävistä maaleista on valittu väriltään musta polyesteripintamaali.

Työn kirjallisessa osassa keskitytään SSAB:n Hämeenlinnan maalipinnoituslinjan kuvaukseen ja erityisesti telamaalauksen käsittelyyn. Telamaalauksella tarkoitetaan liuotinpohjaisen maalin levittämistä sinkityn teräsohutlevyn pinnalle jatkuvatoimisessa maalipinnoitusprosessissa. Tässä työssä keskitytään pintamaalin levittämiseen käytettävään kolmitelamaalaukseen, jonka prosessiin, teoriaan, ominaisuuksiin ja kehittämiseen syvennyttään. Lisäksi syvennyttään siinä syntyviin valittuihin maalauksen virheisiin eli pitkittäissuuntaiseen ja poikittaissuuntaiseen raitavirheeseen.

Kokeellisessa osassa suoritettiin maalin ominaisuuksien mittaaminen ja kapillaariluvun laskenta, ja koeajo ominaisuuksiltaan muokatuilla maalierillä. Kokeellinen osuus on rakennettu kokonaisuudeksi, jonka avulla pyritään tarkastelemaan telamaalausta teorian pohjalta ja laajentamaan ymmärrystä maalien ja telamaalauskooneen parametrien ja ominaisuuksien optimoimiseksi.

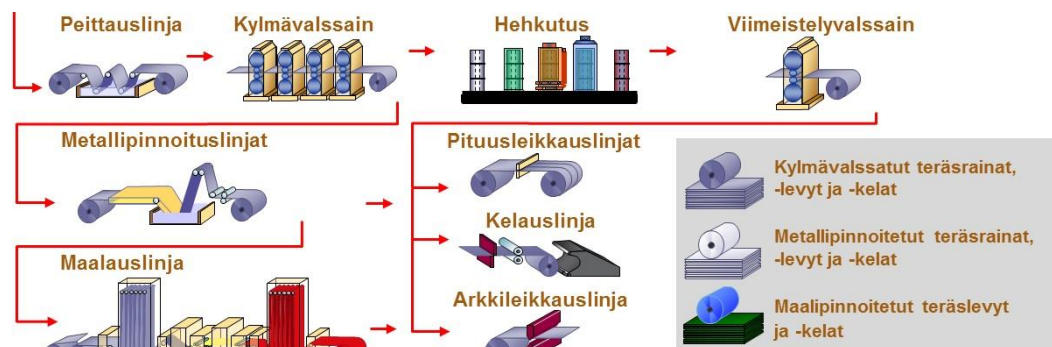
Diplomityössä esitellään telamaalauksen seurauksena esiintyvät raitavirheet ja niiden syntymekanismi, raitojen syntymisen estäminen maalausparametreja optimoimalla ja miten maalin ominaisuudet vaikuttavat telamaalauksen onnistumiseen.

2. SSAB

Uusi SSAB syntyi kesällä 2014, kun ruotsalainen SSAB osti suomalaisen Rautaruukki Oyj:n osake-enemmistön. SSAB:n liikevaihto oli vuonna 2014 60 miljardia Ruotsin kruunua ja SSAB työllisti noin 17000 työntekijää 50 eri maassa. SSAB jakaantuu viiteen divisioonaan, jotka ovat SSAB Special Steels, SSAB Europe, SSAB Americas, Tibnor ja Ruukki Construction. SSAB:llä on tuotantolaitoksia Suomessa, Ruotsissa ja Pohjois-Amerikassa, joiden yhteenlaskettu tuotantokapasiteetti on 8,8 miljoonaa tonnia terästä. SSAB on markkinajohtaja kotimarkkinoilla Pohjoismaissa ja Yhdysvalloissa. SSAB on pitkälle erikoistunut terästuottaja ja on keskittynyt kehittämään entistä lujempia, kevyempiä ja kestävämpiä terästuotteita. [1, 2]

2.1 Hämeenlinnan ohutlevytehdas

SSAB Europan Hämeenlinnan tehdas on Suomen toiseksi suurin SSAB:n tuotantolaitos Raahan jälkeen. Hämeenlinnan tehdas on perustettu 1972 tuottamaan kylmävalssattuja ja sinkittyjä levyjä. Nykyisin Hämeenlinnan tehdas työllistää noin 900 henkeä ja tuottaa kylmävalssattuja, metallipinnoitettuja ja maalipinnoitettuja teräksiä sekä putkituotteita. [3] Tehtaan tuotantoprosessi on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Hämeenlinnan tehtaan tuotantoprosessi [3]

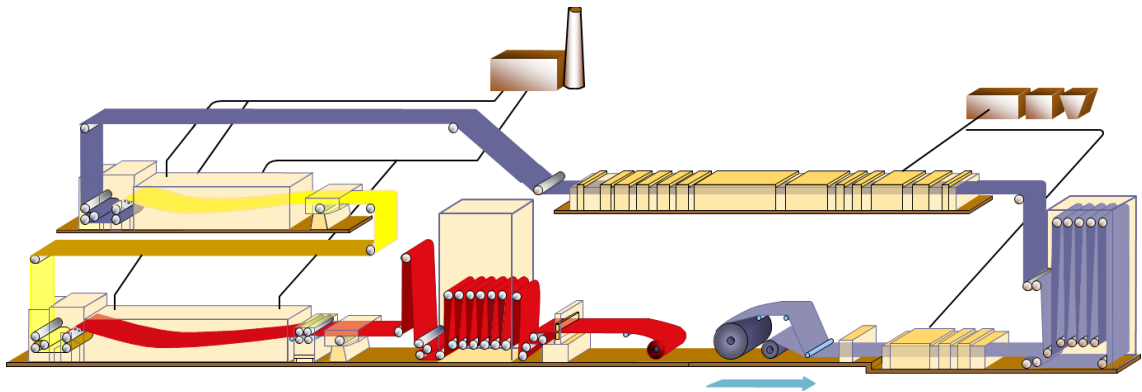
Hämeenlinnan tehtaan tuotantoprosessi alkaa peittauslinjalta, jolla peitataan suolahapolla rautaoksidi kuumavalssatuista teräskeloista, jotka saapuvat junalla Raahesta. Peitatut teräskelat valssataan nelituolisessa tandemvalssaimessa haluttuun teräspaksuuteen 0,5-3,0 mm väliltä. Kylmävalssattu teräs muokkauslujittuu valssauksessa eli teräkseen syntyy jännitystilä kiderakenteen orientoituessa valssaussuuntaan. Teräksen jatkokäsittelyä varten tulee suorittaa rekristallaatiohehkutus muokkausominaisuuksien palauttamiseksi. Yleensä kylmävalssatuista terästuotteista puhuttaessa tarkoitetaan kylmävalssattuja, hehkutettuja eli päästettyjä ja tempervalssaimella viimeistelyvalssattuja teräksiä, mutta

kylmävalssattu tuote voidaan toimittaa myös asiakkaan toiveiden mukaisessa toimitustilassa. Hämeenlinnan tehtaalla on käytössä kellouunihehkutus ja sinkityslinjalla ajettavat teräskelat hehkutetaan sinkityslinjaan integroidussa hehkutusuunissa. [3]

Hämeenlinnassa on 3 metallipinnoitus- eli sinkityslinjaa, joilla voidaan metallipinnoittaa kylmävalssattuja teräskeloja. Metallipinnoitusvaihtoehtoja ovat galfan, galvannealed ja kuumasinkitys. Metallipinnoitetut teräskelat voidaan jatkojalostaa Hämeenlinnan tehtaalla maalipinnoitetuiksi tuotteiksi tai putkituotteiksi. Viimeistelyvalssaimella, metallipinnoitus- ja maalipinnoituslinjoilla valmistetut teräskelat käsitellään rainoiksi pituusleikkauslinjalla, arkeiksi arkkileikkauslinjalla tai uudelleen kelataan tai leikataan osake-loiksi kelauslinjalla. [3]

3. HÄMEENLINNAN MAALIPINNOITUSLINJA

Hämeenlinnan maalipinnoituslinja on perustettu vuonna 1977 ja se tuottaa polyesteri-, PVdF- ja polyuretaanimaalipinnoitettua sekä laminaattipinnoitettua terästä. [3] Maalipinnoituslinja kokonaisuudessaan on esitetty kuvassa 2 Kuva 2.



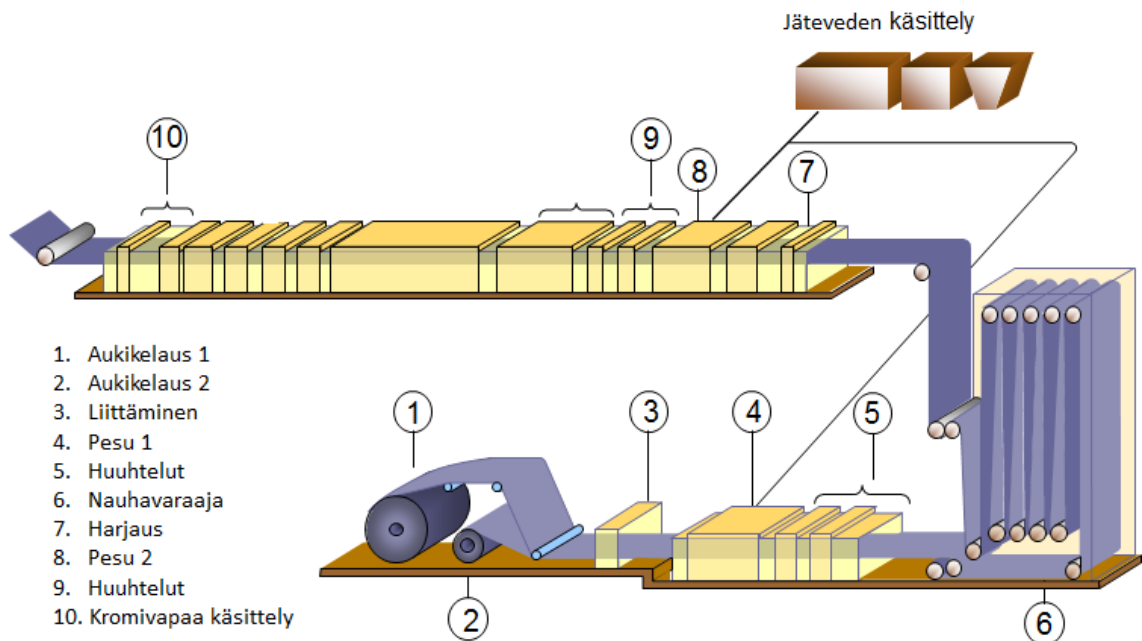
Kuva 2. Hämeenlinnan tehtaan maalipinnoituslinja. [4]

Teräsnauhan kulkusuunta on kuvattu sinisellä nuolella ja nauhan väri on alussa violetti, joka muuttuu pohjamaalauksen jälkeen keltaiseksi ja pintamaalin levityksen jälkeen punaiseksi. Ruskeat rakennukset ovat maalipinnoituslinjan tukitoimintoja: vasemmanpuoleinen on lämpöä tuottava jälkipoltin- ja kattilalaitos ja oikeanpuoleinen vesilaitos, joka puhdistaa esikäsittelyn prosessivettä.

Hämeenlinnan maalipinnoituslinjan mitoitusarvot ovat teräsnauhan suhteen leveys 450–1400 mm ja paksuus 0,3-1,5 mm välillä. Noin 98 % tuotannosta on sinkittyjä kylmävalssattuja ja 2 % on kylmävalssattuja teräsnauhoja. [4]

3.1 Jatkuvatoiminen maalipinnoitusprosessi

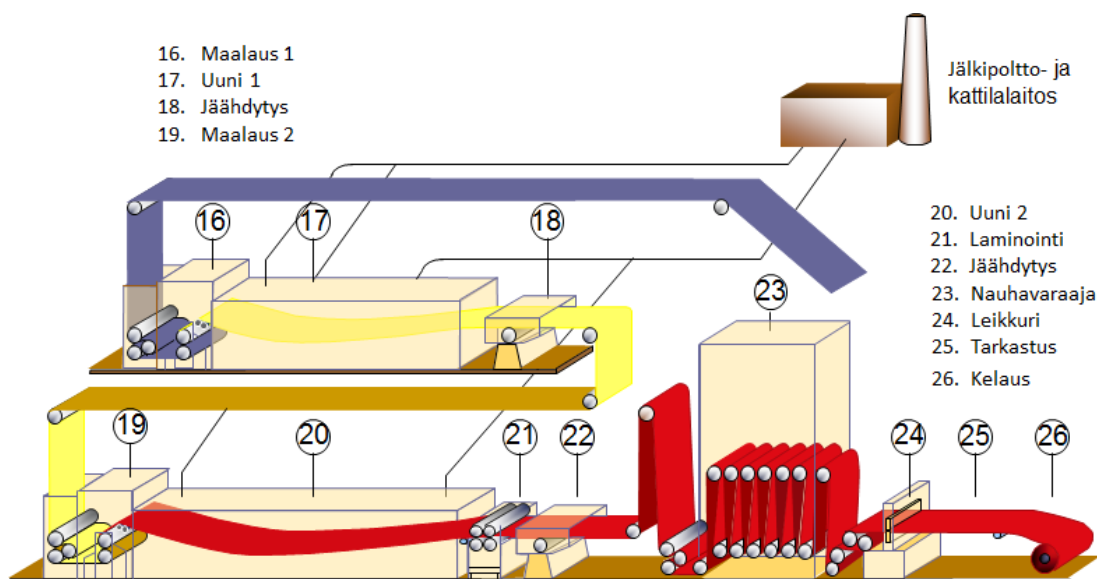
Hämeenlinnan maalipinnoituslinja on jatkuvatoiminen linja eli prosessiossa ei normaalisissa tuotantoajossa pysähdy ja toimii koko ajan. Maalipinnoituslinjalle teräskelat saapuvat tehtaalta kumipyöräkuljetuksella. Teräskelat voivat olla kylmävalssattuja tai kylmävalssattuja ja metallipinnoitettuja, joita suurin osa, noin 98 %, maalipinnoituslinjalle tulevista teräskeloista on. [4] Teräskela nostetaan nosturilla kelansiirtovaunuun, joka siirtää sen aukikelaimen tuurnalle. Aukikelaimia on kaksi, joista toinen syöttää kelasta nauhaa linjaan, ja toisella on kela odottamassa. Linjassa olevat nauhat liitetään toisiinsa mekaanisella liitoksella liitoskoneella. Kuvassa 3 on esitetty tarkemmin maalipinnoituslinjan alkupään toiminnot.



Kuva 3. Maalipinnoituslinjan alkupään toiminnot. [4, muokattu]

Ennen varsinaista prosessiosaa nauha pestään emäksisissä pesuissa ja huuhdellaan vedellä. Ensimmäisen pesuosan jälkeen on nauhavaraja 1, jonka tehtävänä on hankkia aikaa aukikelaukselle ja mekaanisen liitoksen suorittamiselle. Jos nauhavarajasta loppuu nauha, linja pysähtyy. Nauhavarajaa seuraa prosessiosa, joka alkaa emäksisillä pesuilla ja esikäsittelyllä. Nauha pestään uudestaan emäksisellä pesuliuoksella pesuosa 2:n aikana juuri ennen kromivapaata esikäsittelyä.

Esikäsittelyssä käytetään titaani-pohjaista kemikaalia ja lisäaineita sinkityn teräsnauhan pinnan adheesio-ominaisuuksien parantamiseen. Esikäsittelykemikaalit levitetään ruiskuttamalla ja nauhaa vasten olevilla puristusteloilla säädetään kemikaalien pitoisuus sopivaksi. Pinta kuivataan lämpimällä ilmalla. Aiemmin käytössä on ollut alkalinen passivointi ja kromiin perustuva esikäsittely, mutta lainsäädännön muutokseen perustuen kuudenarvoista kromia käyttävät laitteet ja prosessit kielletään siirtymäajan loppuun mennessä. Maalipinnoituslinjan esikäsittelyn jälkeiset osat ovat esitettyinä kuvassa 4.



Kuva 4. Maalipinnoituslinjan loppupään toiminnot. [4, muokattu]

Esikäsiteltyyn nauhaan maalataan ensimmäiseksi maalikerrokseksi primer- eli pohjamaali. Pohjamaalaukone on kaksitelamaalaukone, jolla levitetään pääosin epoksi- ja polyesteripohjaisia pohjamaaleja. Kaksitelamaalaukoneessa on nosto- ja maalaustela, joiden avulla maali nostetaan kaukalosta, säädetään kalvonpaksuus ja siirretään maali nauhan pinnalle. Pohjamaalaukoneella on käytössä lämmönvaihtinjärjestelmä, jonka avulla säädetään maalin lämpötila maalaukseen sopivaksi. Pohjamaalaukoneella maalataan sekä ylä- että alapuoli nauhasta. Maalattu nauha kulkee 4 vyöhykkeiseen pohjamaaliuuniin, jossa maalista haihdutetaan liuotin. Uunin jälkeen ovat vesijäähdytys ja kuivaustelat, jotka jäähdyttävät ja kuivaavat nauhan pinnan.

Pohjamaalattu nauha etenee kolmitelaiselle pintamaalaukoneelle ja nauha maalataan ylä- ja alapinnalta. Pintamaalaukone eroaa pohjamaalaukoneesta ainoastaan mittatelan ja lämmönvaihtimien osalta. Mittatelalla säädetään kalvonpaksuus pintamaalaukoneella. Maalattu nauha kulkee 5 vyöhykkeiseen pintamaaliuuniin, jossa maalista haihdutetaan liuotin. Pintamaaliuunin jälkeen ovat vesijäähdytys ja kuivaustelat, jotka jäähdyttävät ja kuivaavat nauhan pinnan. Käytössä olevat pintamaalit ovat polyesteri-, PVdF- ja polyuretaanipohjaisia maaleja. Maalipinnoituksen lisäksi pintamaalikoneella voidaan vaihtoehtoisesti levittää liimaa laminointia varten. Liima aktivoidaan pintamaaliuunissa. Varsinainen laminointi tapahtuu laminointikoneella, joka on sijoitettu uunin jälkeen. Laminaatti on muovikalvoa, joka liimataan teräksen pinnalle, ja se korvaa maalipinnoitteen.

Prosessiossa päättyy loppupään nauhavaraajaan, jonka tarkoitus on varata aikaa tarkastukselle, näytepalan leikkaamiselle ja päällekelaukselle eli nauhan lopetukselle. Pinnoittaja suorittaa edellä mainitut tehtävät. Näytepalasta analysoidaan linjan laboratoriossa maalipinnoitetun teräksen ominaisuudet ja varmistetaan laatu. Maalipinnoituslinjalla päällekelauksen jälkeen maalipinnoitettu teräskela pakataan suojapaperiin ja kulmasuo-

juksiin kuljetusta varten, jos asiakas on tilannut koko kelan. Mutta jos maalipinnoitettua kelaä jatkojalostetaan Hämeenlinnan tehtaan pituusleikkaus- tai arkkileikkauslinjalla, sidotaan se vain pantanauhalla. Maalipinnoitettua kelaä jatkojalostetaan asiakkaan vaatimusten mukaisiksi tuotteiksi leikkaamalla kelasta vaatimusten levyisiä ja pituisia pituusleikkauslinjalla rainoja ja arkkileikkauslinjalla arkkeja.

3.2 Tuotannossa olevat maalipinnoitteet

Hämeenlinnan maalipinnoituslinjalla tuotetaan polyesteri-, PVdF- ja polyuretaanipohjaisia maalipinnoitettuja tuotteita. Maalipinnoitettujen tuotteiden raaka-aineina ovat yleensä kylmävalssatut ja sinkityt kelat, joiden sinkin neliömassat vaihtelevat 0–275 g/m² ja teräspaksuudet 0,4–1,5 mm välillä. [4, 5]

Hämeenlinnan tehtaan kaikki maalipinnoitetut tuotteet ovat olleet vuodesta 2014 alkaen kuudenarvoisesta kromista vapaita (Cr⁶⁺) eli ne ovat myös ympäristöystävällisiä. SSAB lanseerasi vuonna 2015 Greencoat –brändin, joka on uusi tuoteperhebrändi SSAB:n maalipinnoitetuille tuotteille. Greencoat viittaa maalipinnoitteiden ympäristöystävällisyyteen, joka perustuu maaleissa käytettäviin biopohjaisiin komponentteihin. [2,3]

Epoksipohjaisia maaleja käytetään primer- eli pohjamaaleina, joiden tarkoituksena on parantaa pintamaalin ja pohjan adheesiota ja parantaa korroosion kestävyyttä. Epoksihartsien hyvä tartuttavuus ja kemikaalien, liuottimien, veden ja kuumuuden kestävyys ovat niiden hyviä ominaisuuksia. Herkkyys liituuntumiseen ja huonoon kiillonkestävyyteen ulkokäytössä ovat epoksihartsien heikkouksia. [6, 7]

Polyesteripinnoitteet ovat monikäyttöisiä ja niillä on useita eri käyttökohteita, kuten esimerkiksi sähkö- ja elektroniikkateollisuuden tuotteet, kodinkoneet ja rakennustuotteet. Polyesteripinnoitteiden soveltuvuuden useisiin käyttökohteisiin mahdollistaa niiden ominaisuuksien vaivaton muokkaaminen käyttökohteen vaatimusten mukaisiksi. Polyesteripinnoitteita valmistetaan useilla eri kiiltoasteilla ja laajalla väriskaalalla sekä sileänä että strukturoituna. [6, 7] Esimerkki strukturoidusta polyesteristä valmistetusta tuotteesta on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Strukturoidulla polyesterillä pinnoitetusta ohutlevystä valmistettu säilytyskaappi. [3]

Strukturoidusta polyesterista käytetään myös nimitystä mattapolyesteri matalan kiillon takia. Kaikki polyesteripinnoitteet ovat muovattavuusominaisuuksiltaan hyviä kuten myös mekaanista kulutusta kestäviä. Erityisesti ARS-polyesteripinnoite on näiltä ominaisuuksiltaan hyvä ja siksi metallituoteteollisuuden suosiossa. Polyesteripohjaisia pohjamaaleja käytetään tiettyjen pinnoitteiden yhteydessä ja niitä ei tule sekoittaa ominaisuuksiltaan polyesteripintamaaleihin. Tässä työssä keskitytään pintamaalien ominaisuuksiin ja maalaukseen erityisesti polyesteripinnoitteiden osalta. [6, 7]

Purex on polyuretaanipohjainen kestumuveihin kuuluva strukturoitu maalipinnoite, joka myös sisältää polyesteriosan. Purex on hyvin säänkestävä, naarmunkestävä ja korroosiota kestävä. Purex HB omaa normaalia paksumman pohjamaalin kalvonpaksuuden ja antaa siten paremman korroosiosuojan. Purex omaa hyvät muovattavuus ominaisuudet myös kylmässä, joten se on suosittu erityisesti katto- ja peltiseppätuotteissa, josta esimerkkikäyttökohde on esitettyä kuvassa 6. [6, 7]



Kuva 6. Talon katon pinnoitteena on käytetty Purex-pinnoitetta. [6]

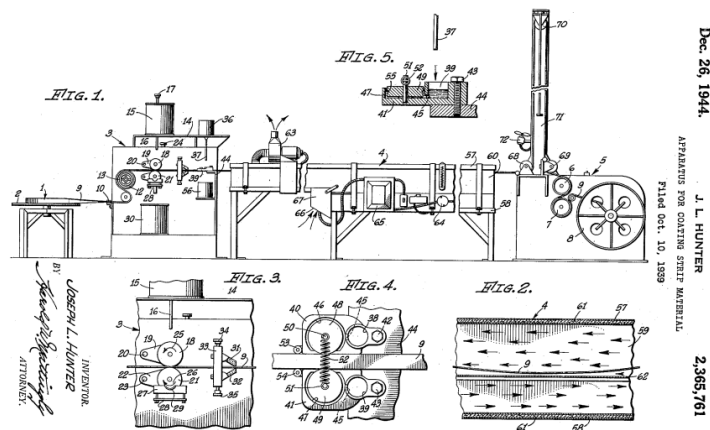
Hiarc on PVdF-pohjainen pinnoite, jota käytetään erityisesti julkisivuissa ja suojapellityksessä, joista esimerkkikäyttökohde on esitettynä kuvassa 7. Hiarc matta on matala kiiltoinen, Hiarc reflect on auringon lämpösäteilyä heijastava ja Hiarc max on pinnoitepaksuudeltaan paksumpi versio. Hiarc-pinnoitteiden värin ja UV-säteilyn kesto ovat erinomaiset eli niiden värit eivät muutu tai haalistu. Hiarc-pinnoitteet ovat lujia, hyvin muovausta kestäviä ja helppoja pitää puhtaana. Hiarc-pinnoitteet ovat korroosion kestävyydeltään erinomaisia. [6, 7]



Kuva 7. PVdF-maalipinnoitettu julkisivuverhous rakennuksessa. [6]

4. TELAMAALAUUS

Teollisessa maalipinnoituksessa 1930-luvulla telamaalausta käytettiin lakan levittämiseen teräksen tai metallipinnoitetun teräksen pinnalle Saksassa. [8, 9] Vastakkaistelamaalauksen keksi ja patentoi saksalainen Carl Münch 1932. [10] Jatkuvan maalipinnoitusprosessin keksi kalifornialainen Joseph L. Hunter 1930-luvun loppupuolella sälekaihtimien voimakkaan kysynnän vaikutuksesta ja näin edisti teräksen teollista jatkuvatoimista maalipinnoitusta. [11, 12] Kuvassa 8 on esitetty Hunterin hakeman patentin piirustus.



Kuva 8. Joseph L. Hunterin patentoitu maalipinnoituslinja [11]

Toisen maailman sodan jälkeinen aika oli nopeaa kehityksen ja kysynnän kasvun aikaa maalipinnoitetuille tuotteille leviten Amerikasta muualle maailmaan. [8] Euroopan ensimmäinen leveää teräsnauhaa maalipinnoittava linja avattiin 1959 Wuppertaliin ja myöhemmin 1960-luvulla muualle Eurooppaan rakennettiin lisää maalipinnoituslinjoja. [8, 9]

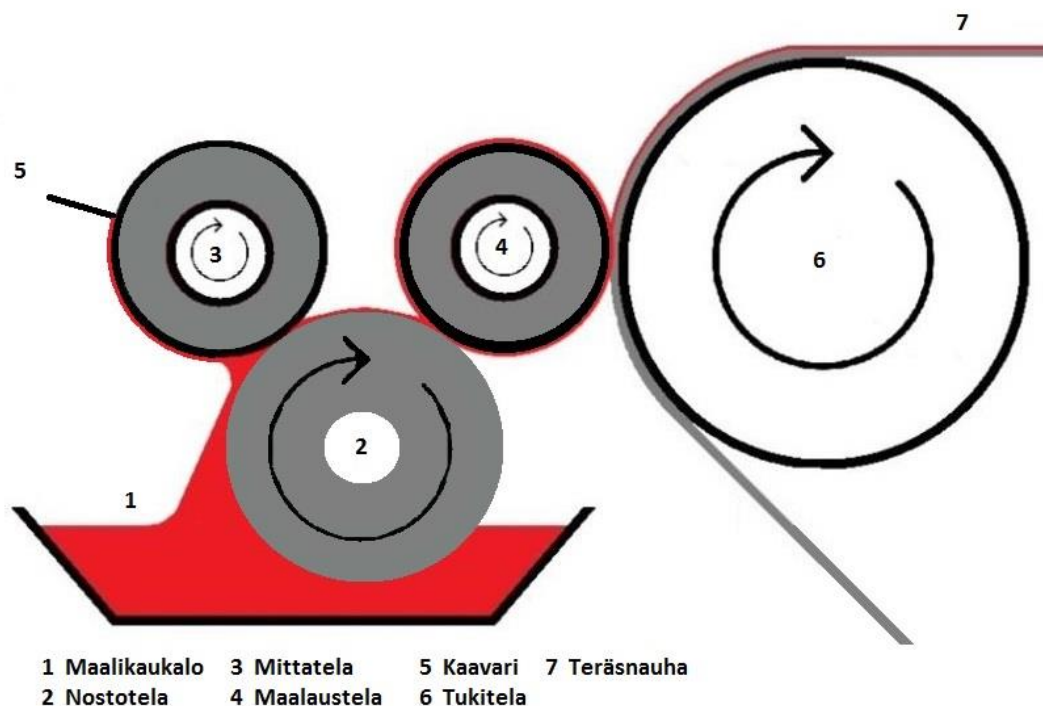
1930–40-luvuilla maalattiin terästä ja alumiinia sälekaihtimia ja muita niche tuotteita varten alkydi-, vinyyli- ja akryyli-maaleilla linjanopeudella 12 m/min. Nykyisin linjanopeus on keskimäärin 120 m/min ja pohjamateriaalivaihtoehtoina ovat pysyneet alumiini ja teräs, jota maalataan myös metallipinnoitettuna. Maaleina käytetään muun muassa polyesteri-, PVdF- ja polyuretaanimaaleja. Telamaalaus on yleisin tapa levittää maalia jatkuvatoimisessa maalipinnoituksessa tänä päivänä. [8]

4.1 Maalaus kone

Hämeenlinnan maalipinnoituslinjalla on kaksi pintamaalauskonetta, joilla maalataan nauhan ylä- ja alapinta samassa maalaushuoneessa ennen pintamaaliuunin. Tässä työssä tarkastellaan asiakkaan kannalta vaativamman yläpinnan maalaavaa pintamaalikonetta.

Pintamaalaus koneet ovat toimintaperiaatteeltaan samanlaisia, joten niitä käsitellään tässä työssä identtisinä. Pintamaalaus koneet ovat samaan runkoon asennettuina, jota voidaan liikuttaa siten, että on mahdollista maalata molemmilla maalaus koneilla tukitelaa vasten olevaa teräsnauhaa, tosin vain yhdellä maalaus koneella kerrallaan. Vaihtomahdollisuus mahdollistaa tehokkaamman tuotannon: teloja voidaan pestä tai maali valmistella ajoin samaan aikaan kun maalataan toista maalia.

Pintamaalaus kone on kolmen toisiaan vasten olevan telan muodostama konstruktio, jonka tehtävä on levittää liuotinpohjainen maali teräsnauhan pinnalle. Maalaus koneen rakenne ja telojen pyörimissuunnat ovat esitettynä kuvassa 9.



Kuva 9. Maalaus kone [13, muokattu]

Maalaus koneessa käytetään maalaustelana päistä laakeroitua teräsrunkoista polyuretaanikumilla pinnoitettua telaa. Mittatela ja maalaustela vastaavat toisiaan. Nostotelana käytetään kovakromattua telaa. Kaukalo on ruostumattomasta teräksestä valmistettu astia, jonka tarkoituksena on varmistaa maalin riittävyys nostotelalla. Mittatelaa vasten oleva kaavari koostuu terästä ja sen pidikkeestä. Kaikki maalaus koneen telat ja tukitela pyörivät samaan suuntaan muodostaen niiden kosketuskohtaan vastakkaisiin suuntiin

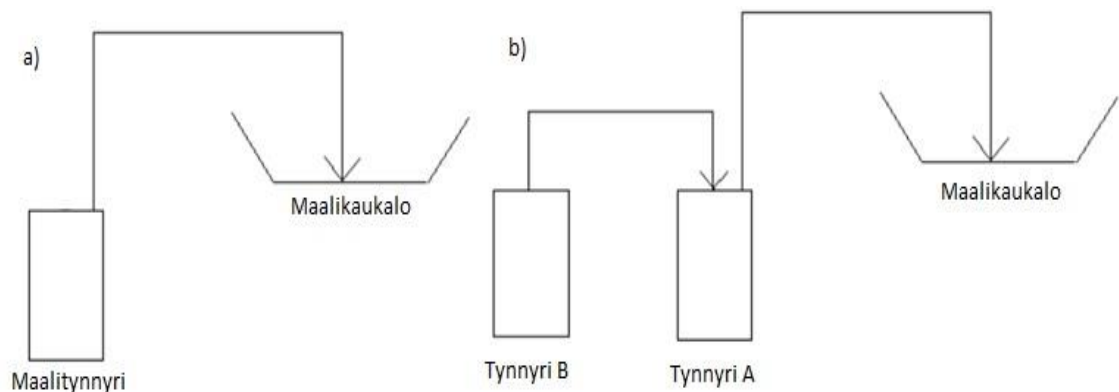
kohdistuvan pyörimisliikkeen, mikä määrittää, että kyseessä on vastakkaissuuntainen telamaalaus.

Maalaukset säädetään askelmoottoreilla, joiden veto välittyy teloihin niiden päistä. Askelmoottoreilla säädetään telojen nopeutta ja niiden puristusta toisiaan vasten. Moottoreita voidaan säätää käsin maalaukseen vierestä tai tietokoneelta. Säättämisen apuna käytetään kalvonpaksuusmittaria, joka on sijoitettu tukitelan yläpuolelle mittaamaan maalin märkäkalvon paksuutta. Kalvonpaksuusmittarin yhteydessä on myös lämpötilamittari, joka mittaa maalin lämpötilaa maalauksen jälkeen.

Maalaukseen voidaan käsittää myös kuuluvaksi maalauksessa tarvittavat lisälaitteet, joita ovat pumput, putket, maalitynnyrin sekoittajat ja lämmönvaihtimet. Tällä hetkellä pintamaalauksessa ei ole käytössä lämmönvaihtimia, mutta pohjamaalauksella lämmönvaihtimet ovat käytössä ja niillä maalin lämpötila pidetään vakiona. Pintamaalauksella lämmönvaihtimien käyttöönottoa on kokeiltu ja niille on mitoitettu paikat maalaushuoneesta.

4.2 Maalaustapahtuma

Maalauksen aloitus maalaushuoneessa alkaa maalin sekoittamisesta tynnyrissä, joka suoritetaan tynnyriin asetettavalla terälevyllä varustetulla sekoittajalla. Kun maalia on sekoitettu sopiva aika, voidaan sitä alkaa pumppaamaan maalaukseen kaukaloon. Maalia pumpataan tynnyristä kaukaloon kalvopumpulla, mutta pumppauksessa voidaan käyttää myös kahta tynnyriä, kuten kuvassa 10 on esitetty [14].

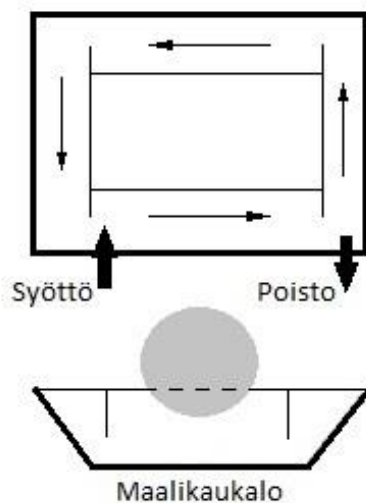


Kuva 10. a) Maalin pumppaus kaukaloon ja b) pumppaus kahta tynnyriä käyttäen. [14, muokattu]

Tynnyristä B pumpataan saman erän maalia tynnyriin A, josta pumpataan maalikaualoon. Kahden tynnyrin pumppaussysteemillä voidaan tasoittaa maalien lämpötilaeroa ja sitä kautta tasoittaa maalin viskositeetin vaihtelua. [14] Normaalisti käytetään kuitenkin vain yhden maalitynnyrin pumppausta maalauksen aikana. Kaukalosta virtaa maalia takaisin maalitynnyriin kaukalon pohjassa olevasta kanavasta, joka on esitetty ”poisto”

kuvassa 11. Tällaisella järjestetyllä varmistetaan maalin tasainen kiertäminen tynnyrin ja kaukalon välillä sekä edelleen teloille ja sieltä tynnyriin.

Kaukalossa olevan maalin määrää voidaan säädellä pumppausnopeudella. Kaukalossa maali virtaa padon yli maalauskoneen nostotelan nostettavaksi samalla pakottaen maalissa olevan ilman painumisen kaukalon pohjalle. Padon tarkoitus on tasoittaa maalin virtausta kaukalossa ja vähentää maalin aaltoilua, ettei se vaikuta maalauksen onnistumiseen ilmentymällä maalatussa pinnassa. Maalikaukan padon toimintaperiaate on esitettyä kuvassa 11 Kuva 11. [15]



Kuva 11. Maalin kierto kaukalossa. [15, muokattu]

Maali kiertää kaukalon reunojen kautta keskellä, johon nostotela laskeutuu kaukalon korkeutta säätämällä. Kaukalon korkeussäädöllä ja maalin määrällä voidaan omalta osaltaan vaikuttaa nostotelan nostaman maalin määrään eli kuinka paljon maalia virtaa nostotelan mukana mittatelan väliseen nippiin eli telojen väliselle puristusalueelle.

Nostotelan kyky nostaa maalia perustuu pyörimisliikkeen synnyttämään imuun ja maalin koheesioon, johon vaikuttavat pintajännitys ja viskositeetti omalta osaltaan. Nostotelan pyörimisnopeus on suoraan verrannollinen nostettavan maalin tilavuusvirtaan, joka kulkeutuu nostotelan pinnalla ylöspäin. Nostotelan pyöriessä maaliin voi sekoittua ilmaa tai syntyä kavitaation aiheuttamia kuplia, jos pyöriminen on liian voimakasta. Maalin koheesio ansiosta maali on yhtenäinen pinta, joka nousee tasaisesti maalikaualosta.

Nostotelan ja mittatelan välisessä nipissä maali puristuu telojen väliin syntyneestä raosta. Mittatela nimensä mukaisesti mittaa märkäkalvon oikean paksuiseksi ja estää ylimääräisen maalin pääsyn nipin lävitse. Maali kulkeutuu mittatelan pinnalla kaavarille, joka pyyhkii pinnan puhtaaksi valuttaen maalin takaisin kaukalo. Kalvonpaksuuden säätäminen perustuu kalvonpaksuusmittarin ilmoittamaan märkäkalvon paksuuteen, jota

maalari käyttää apuna mittatelan puristusta säätäessä. Mittatelan puristuksen voimakkuutta säätämällä voidaan muuttaa raon kokoa ja sitä kautta myös läpi virtaavan maalin määrää, joka nipin jälkeen muodostaa nostotelan pinnalla jatkavan märkäkalvon.

Nostotela kuljettaa mitatun märkäkalvon maalaustelalle, jolle maali siirtyy edellä mainittujen telojen välisessä nipissä. Maalaustela kuljettaa maalin telan ja teräsnauhan väliin nippiin, jossa se levitetään pohjamaalin pinnalle. Tukitelaa vasten oleva nauha liikkuu linjanopeudella ja pyyhkii maalaustelassa olevan maalin mukanaan. Tukitelan tehtävänä on tukea teräsnauhaa maalaustelan kohdistuessa siihen painetta maalauksen aikana.

4.3 Teoriat telamaalauksen taustalla

Virtausdynamikka käsittelee nesteiden virtaamista ja sillä pyritään selittämään ja ole-massa olevia malleja käyttämällä ennustamaan virtaukseen liittyviä ilmiöitä. Virtausdynamikka tarkastelee nesteiden virtausta makroskooppisen teorian tavoin eli yksittäisten hiukkasten liike tai välimatka ei ole merkityksellisiä vaan niiden muodostaman joukon keskimääräinen liike. Tämä mahdollistaa aineen käsittelyn jatkuvana, jota se virtausdynamikan sovelluksissa usein onkin. [16, 17]

Jatkuvan aineen virtaus vuorottelee laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen välillä. Nesteen virtaus voi vaihdella niiden välillä ja ilmentää molemmille tyypillistä käyttäytymistä, mitä nimitetään siirtymävaiheen virtaukseksi. Laminaarinen virtaus kuvataan vakaaksi virtaukseksi, jossa virtausgradientit menevät samaan suuntaan järjestyksessä. Turbulentti virtaus kuvataan epävakaaksi virtaukseksi, jossa vallitsee pyörteiden kaaos. [16, 17] Virtauksen muuttuminen laminaarisesta turbulenttiseksi virtaukseksi määritellään Reynoldsin luvulla, joka voidaan laskea kaavalla

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}, \quad (1)$$

jossa ρ tiheys, u nesteen virtausnopeus, L virtauksen kulkema matka ja μ dynaaminen viskositeetti. Reynoldsin luvun kasvaessa virtaus muuttuu turbulentiksi ylitettyään kriittisen luvun Re_c arvon. [16, 17]

Voiteluteoria ei varsinaisesti ole osa virtausdynamikkaa, mutta telamaalauksen tutkimuksessa sitä voidaan soveltaa tietyin reunaehdoin virtausdynamikan rinnalla. Sitä voidaan hyödyntää erityisesti siitä syystä, että pyörivien telojen väliin syötetään maalia, joka edesauttaa sen pyörimisliikkeen ylläpitoa vähentämällä telojen hankauksesta aiheutuvaa kitkaa eli se voitelee telojen välisen kosketusalueen. Voiteluteoria on silloin voimassa, kun kaavassa 2 esitetty ehto toteutuu

$$\varepsilon = \frac{H}{L}, \text{ kun } \varepsilon \ll 1 \quad (2)$$

H on maalin märkäkalvon paksuus ja L on teräsnauhan pituus tai telan halkaisija, tällöin ε on telamaalauksessa aina huomattavasti pienempi. Telan puristus määrää voiteluteorian mukaisesti kalvonpaksuutta eli kuinka hyvin maali voitelee teloja ja virtaa raossa. Siksi maalin pintajännitys on merkittävässä roolissa voiteluteoriaa sovellettaessa. [18] Esimerkiksi Alonso et. al käytti apunaan voiteluteoriaa tutkiessaan telamaalauksen prosessiviskositeettia ja sai sen avulla selvitettyä painegradienttien vaikutuksen viskositeettiin telamaalauksen aikana. [19]

Virtausdynamiikkaan kuuluvat Navier-Stokes yhtälöt selittävät paremmin maalin käyttymistä kuin voiteluteoria ja varhaisemmat puoliksi upotetut telat –mallit, sillä Navier-Stokes yhtälöt ottavat huomioon kostumiskohdan ja mitatun märkäkalvon eivätkä pidä niitä irrallisena ilmiönä maalin siirtymisen virtauksesta. Navier-Stokes yhtälöitä voidaan hyödyntää FEM-laskennassa, jota useat eri tutkijat ovat julkaisseet telamaalauksesta, kuten esimerkiksi Coyle et al. ja Belblidia et al. FEM-laskentaa hyödynnetään erityisesti vapaiden pintojen muutoksen laskemisessa ja meninskin tutkimisen yhteydessä. [20, 21] Vapailla pinnoilla käsitetään kuvan 12 mukaisesti maalin saapuvan ja lähtevän virtauksen väliin jäävä alue, mutta myös vastaava tilanne meninskin ja telojen nipin toisella puolella.

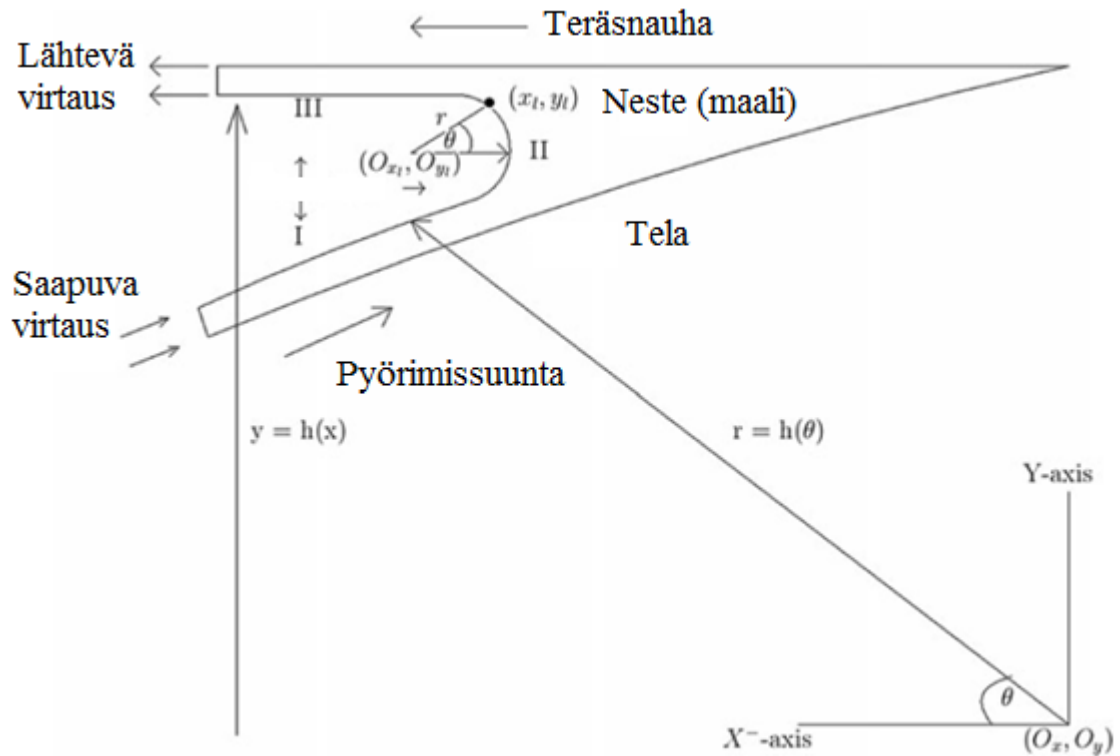
Navier-Stokes yhtälöt ja niiden johdokset ovat usein hankalasti ratkaistavissa käsin laskemalla. Tietokoneiden ansiosta niiden ratkaiseminen on helpottunut ja niitä hyödyntävillä tietokoneohjelmilla voidaan suorittaa nesteen virtauksen mallintamista (computational fluid dynamics) helposti ja vaivattomasti. CFD mallinnuksen avulla voidaan simuloida nesteiden virtausta ja samanaikaisesti muuttaa vallitsevia olosuhteita samanaikaisesti saaden dataa muutoksen vaikutuksesta nesteen virtaukseen. CFD mallinnuksessa käytetään hyväksi FEM mallien lisäksi muitakin samantapaisia työkaluja.

4.4 Meninski

Meninski on telojen välinen nesteellä täyttynyt kosketusalue. Meninskiksi nimitetään yleisesti nesteen kapillaarin muodostaa virtausrintamaa, joka täyttää putken tai telamaalauksen tapauksessa tiukasti yhteen puristuneen nippiraon. Vastakkaistelamaalauksessa meninski siirtyy enemmän tulopuolelle nippi, kun taas myötään maalattaessa meninski muodostuu tasaisesti tulo- ja lähtöpuolelle nippiä. Kuvassa 12 on esitetty skemaattinen piirros meninskin muodostumisesta telojen väliin tulopuolelle. Linjanopeudella on vaikutusta meninskin kokoon ja sen muodostumiseen telojen väliin [20, 21].

Vastakkaistelamaalauksen tulopuolella meninski on voimakkaasti kaareutunut tulosuuntaan vastakkaisen telan suuntaiseksi, koska lähtöpuolelle ei haluta päästää suurien telanopeuksien ja maali märkäkalvon mittatarkkuuden pysyvyyden takia. Maalaustelalla meninskistä kuitenkin erkanee hieman maalia myös maalaustelalle, koska linjanopeus eli tukitelan nopeus ei riitä pyyhkimään maalaustelaa täysin maalista puhtaaksi. Nosto-

telan ja maalaustelan välisessä nipissä meninskin läpi myös pääsee maalia, mutta se jatkaa matkaansa kaukaloön, joten sen vaikutus telamaalauksessa on mitätön.



Kuva 12. Meninskin muodostumiseen vaikuttavat tekijät teräsnauhan ja telan välillä [21, muokattu]

Kuva 12 maalin saapuvan ja lähtevän virtauksen väliin jää vapaan pinnan alue, jota kuvaa kaksi erisuuntia lähtevää nuolta. Se on samalla stagnaatio- eli erkanemispiste maalikalvoille teräsnauhan ja telan välillä. On tärkeää, että lähtevän ja saapuvan virtauksen välille jää riittävä väli, koska muuten väliin voi päästä ilmaa.

Meninskiin tulee olla jatkuva virta maalia sen ylläpidon takia ja myös sen paikka telojen välisessä nipissä tulisi olla vastakkaistelamaalauksessa tulopuolella nippiä. Meninskiin vaikuttaa polymeeripinnoitettuja teloja hyödyntävässä telamaalauksessa niiden muodon muuttuminen puristumisen seurauksena metallipintaista telaa vasten. Tätä nimitetään kirjallisuudessa negatiiviseksi raoksi, jonka muodostumisen periaate telojen välisessä puristuksessa on esitetty kuvassa 14.

Negatiivinen rako nimitys johtuu metallipintaisten telan leikatessa puristuvan telan kaaren. Negatiivisessa raossa maaliin kohdistuu suuremmat leikkausvoimat kuin normaalisessa raossa eli se leikkaantuu maalauksessa enemmän. Muokkautuneen polymeeripintaisten ja terästelan väliin syntyy elastohydrodynaaminen virtauskenttä. Muokkautuneen alueen läpäistessään neste synnyttää paineen, joka muokkaa elastista polymeeripintaista

tela ja synnyttää virtausraon. Meninskin vakautta voidaan arvioida voiteluteorian ja viskokapillaarimallin perusteella. [22]

4.5 Telojen ominaisuudet

Polyuretaanisten mitta- ja maalaustelojen kovuus on n. 55–60 Shore A –yksikköä, pinnanankarheus R_a noin 1,3–1,6 μm ja niiden halkaisijat vaihtelevat 230–250 mm välillä riippuen niiden kuluneisuudesta ja kunnostuskerroista. Kovakromatun nostotelan halkaisija on 265 mm. [23]

Polyuretaaniset mitta- ja maalaustelat kuluvat käytössä ja niitä kunnostetaan koneistamalla kumipintaa. Niiden kuntoa tarkkaillaan maalauksen yhteydessä jatkuvasti ja tarpeen tullen ne lähetetään telahiomoon kunnostettavaksi. Kunnostuksen yhteydessä niistä poistetaan tarpeellinen paksuus huonoa pintaa. Myös nostotelan kovakromattua pintaa kunnostetaan, mutta sen kunnostusväli on huomattavasti pidempi kuin polyuretaanisten telojen. [24, 25, 26]

Pinnoitetut telat kuluvat ajon aikana, erityisesti maalaustela, joka hankaa teräsnauhaa vasten sen leikaten maalaustelaan urat teräsnauhan leveydellä. [8] Teräsnauhaa ajetaan useammalla eri leveydellä ja siksi urat voivat olla useammassa paikkaa maalaustelaa, kuten on esitetty kuvassa 13 Kuva 13.



Kuva 13. Teräsnauhan kuluttamat urat maalaustelassa.

Kivihaka arvioi tutkimuksessaan, että paksu sinkkipinta on epätasainen nauhan leveyden suhteen, koska sinkkiä kertyy enemmän nauhan reunaan ja tämä voi aiheuttaa maalaustelojen nopeampaa kulumista pidemmässä ajossa. [27] Eli myös epätasaisen sinkkipinnan voidaan olettaa aiheuttavan voimakkaampaa kulumista, vaikkei sitä ole tutkittukaan. Pejaković et al. tutkivat polymeeripintaisten telojen kulumista ASTM G 65 teräspyöräkokeella ja totesivat kovempien telojen kuluvan hitaammin kuin pehmeiden, mutta pehmeimmässä telassa, 60 Shore A, kulumisen teräspintaa vasten ei aiheuttanut uurteita. [28] Mittatelan tilanne on melko vastaava kuin teräspyöräkokeessa, joten vaikka se kuluu pyöriessään nostotelaa vasten, voidaan olettaa Pejaković et al. tutkimuksen perusteella, että sen kulumisen on tasaista eikä siihen synny uurteita.

Savikko tutki diplomityössään telojen kestoa ja niiden ominaisuuksia. Tutkimuksen tuloksena maalaustelan vaihtotaajuus oli keskimäärin 13 tuntia tai noin 51 000 metriä.

Useimmiten vaihdon syynä olivat urat nauhasta. Noin joka toinen kerta vaihdon syyksi merkittiin ”varmuudeksi”. Maalauksen virhe tai pitkittäinen raita katsottiin johtuvan useimmiten mittatelasta, mikä oli syynä noin joka neljänteen telanvaihtoon. Savikko toteaa telojen kestävyydestä, että se on hyvin riippuvaista käytetyistä telanopeuksista ja –paineista. [23]

Kumioinnista telalta poistetaan vanha pinnoite mekaanisesti ja kemiallisesti. Puhdistettu teräsrunko pinnoitetaan uudelleen. Polyuretaanisissa teloissa ei saa olla saumoja, sillä ne merkkaisivat maalauksen yhteydessä nauhaa pyöriessään. Telahiomossa uusista teloista poistetaan hieman hyvän pinnan takaamiseksi ennen niiden käyttöönottoa maalaamossa. [24]

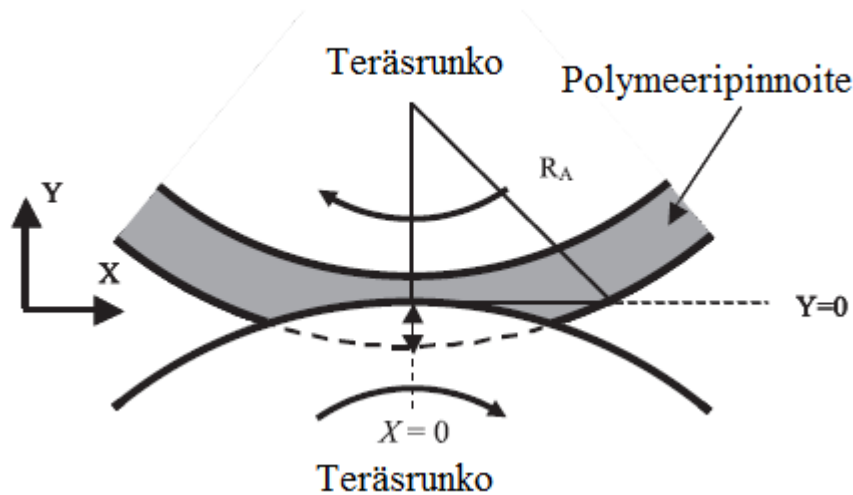
Telahiomossa on kaksi laikkahiomakonetta, joita käytetään telojen kunnostamiseen. Maalaus- ja mittatelat kunnostetaan käyttämällä pehmeille materiaaleille sopivaa laikkaa ja kunnostetaan omien laakerien varassa pyörien. Telat huuhdellaan kunnostuksen jälkeen vedellä, joka kokemuksen perusteella on parempi huuhteluliuos kuin aiemmin käytetty liuotin. Vesihuuhtelun käyttäminen on pidentänyt telojen käyttöikää noin yhteen vuoteen ja sen lisäksi se on pienentänyt venymän syntymisen mahdollisuutta huomattavasti eli parantanut telahionnan onnistumista. [24]

Telojen rungossa olevat laakerit tarkastetaan ja huolletaan hionnan yhteydessä. Laakereissa käytetään voiteluaineena putkikierretiiivistettä, joka on myös kokemuksen perusteella pidentänyt laakereiden käyttöikää. Laakerit välittävät teloihin moottoreiden vedon ja maalauksen onnistumisen kannalta laakereiden tulisi olla mahdollisimman hyvässä kunnossa. Myös telojen teräsrungot tarkastetaan kunnostamisen aikana, sillä ne ovat käytössä jatkuvasti ja siksi on tärkeää myös seurata niiden kuntoa. Jos niissä huomataan selvää värinää kunnostuksen yhteydessä, ne poistetaan käytöstä. Rungoissa ja teloissa on itsessään pientä heittoa, joka on niille ominaista. [24] Ihanteellinen tela olisi täysin värinätön ja rullaisi laakereillaan tasaisesti.

4.6 Telojen säätö

Maalaukseen teloja voidaan säätää seuraavien ominaisuuksien suhteen: pyörimissuunta, telojen välinen puristus ja telan pyörimisnopeus. Pyörimissuunta on valittu kaikille teloille samansuuntaiseksi eli telojen kohdatessa toisensa pyörimissuunnat ovat tällöin vastakkaisuuntaiset. Maalaus-, nosto- ja mittatelaa voidaan säätää erikseen ja ne ovat toisistaan riippumattomia säätämisen suhteen, kuitenkin ottaen huomioon esimerkiksi telojen välisen puristuksen vaikutus molempiin säädettäviin teloihin nopeuden suhteen. Maalaukseen teloja säädetään maalauslinjan ajonopeuden mukaan ja ennalta hyväksi havaittujen telanopeuksien perusteella. [29] Judinin julkaiseman sisäisen raportin [30] perusteella on laadittu ohje tiettyjen pinnoitteiden maalaamiseksi, jossa tarkasti kuvataan maalauksen onnistumisen edellytykset osa-aluekohtaisesti. [31]

Telojen väliin syntyy paine, kun teloja puristetaan toisiaan vasten tasaisella voimalla. Puristus synnytetään askelmoottoreilla. Puristusvoimaa muuttamalla säädetään kalvon-paksuutta samalla ottaen huomioon pyörimisnopeus. Maalaus- ja mittatelat muuttavat muotoon kumipinnoitteen osalta poikkileikkausprofiililtaan sivusta katsottuna koveriksi, kun niitä puristetaan metallista nostotelaa vasten, kuten kuvassa 14 on esitetty.



Kuva 14. Polyuretaanipinnoitettu tela kovakromista telaa vasten puristuneena. [22, muokattu]

Kuvassa 14 Kuva 14 on hieman liioiteltu telan muodonmuutoksen suuruutta ja siitä puuttuu maalin virtaus katkeamattomana nauhana telojen välissä ja sen aiheuttama me-ninski. Telapinnoitteen muodonmuutos ja pyörimisliike mahdollistavat maalin virtaami-sen telojen väliin ja sitä kautta maali synnyttää niin sanotun raon telojen väliin, jonka suuruutta eli maalin tilavuusvirtaa säädetään puristusvoimaa säätämällä.

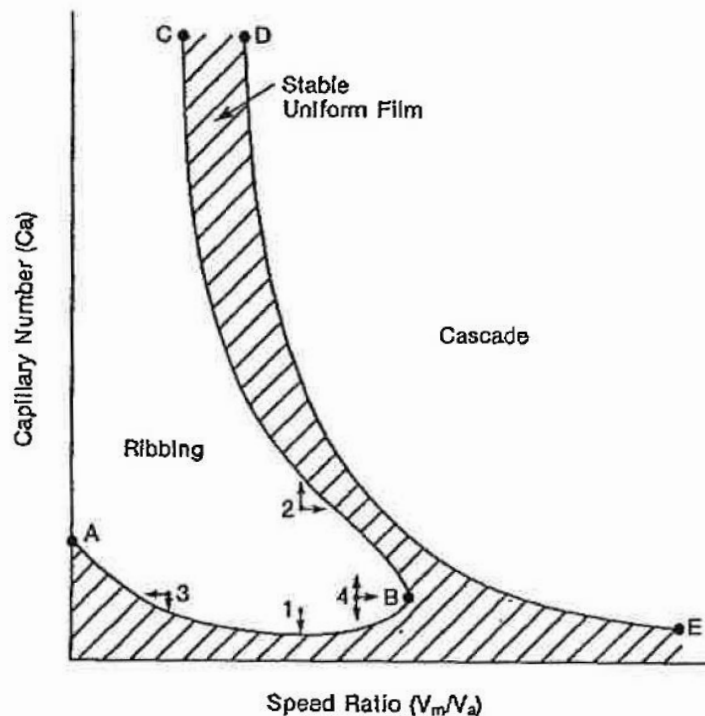
4.7 Telamaalauksen virheet

Maalipinnoitusprosessin tarkoituksena on tuottaa virheettömiä ja laadullisesti korkeata-soisia tuotteita, mutta prosessin monimutkaisuudesta johtuen siinä syntyy eri lähteistä johtuvia virheellisiä tuotteita. Telamaalausprosessi on yksi mahdollinen virhelähde. Te-lamaalauksessa syntyviä virheitä on tunnistettu useita. Tässä työssä keskitytään pitkit-täissuuntaisen ja poikittaissuuntaisen raitakuvion syntymistapaan ja sen syntymiseen vaikuttamiseen. Raitakuviot voidaan katsoa johtuvan maalaustapahtumassa käytetyistä maaleista, maalauskoneesta ja parametreista. Raitakuviot ovat ilmiöinä irrallisia toisis-taan, mutta voivat myös esiintyä yhtä aikaisesti maalatussa tuotteessa.

4.7.1 Pitkittäinen raita

Pitkittäisen raidan syntymistä on tutkittu telamaalauksen osalta laajasti verrattuna poikittaisen raidan syntymiseen. Pitkittäisen raidan syntymiseen vaikuttaa telamaalauksessa käytettävät telanopeudet ja maalin ominaisuudet. [20, 32].

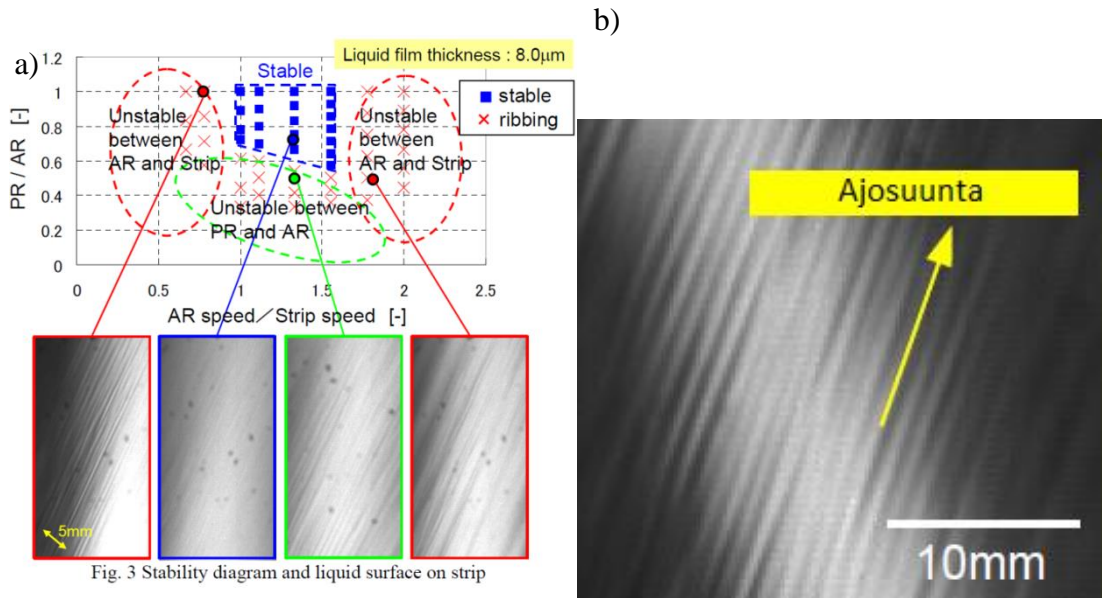
Coyle et al. tutki FEM-analyysin avulla vastakkaiskaksitelamaalausta eri telanopeussuhteilla. Telamaalaukskoneessa oli kaksi terästela, joista toisella nostettiin ja maalattiin maali ja toisella mitattiin kalvonpaksuus raon avulla oikeaksi. Tutkittavina liuoksina oli vesipohjaisia liuoksia, joiden kapillaariluvut laskettiin niiden ominaisuuksista. Coyle et al. päätyi kokeiden perusteella tutkimuksessa johtopäätökseen, että on mahdollista löytää telanopeussuhteen ja kapillaariluvun avulla sopiva kombinaatio, joka tuottaa tasaisen maalaustuloksen ja visuaalisesti hyvän maalipinnan. Coyle et al. tutkimuksessa esittämä maalauksen vakautta kuvaava diagrammi on esitetty kuvassa 15. [20]



Kuva 15. Maalauksen onnistuminen esitettynä kapillaariluvun ja nopeussuhteen avulla [20]

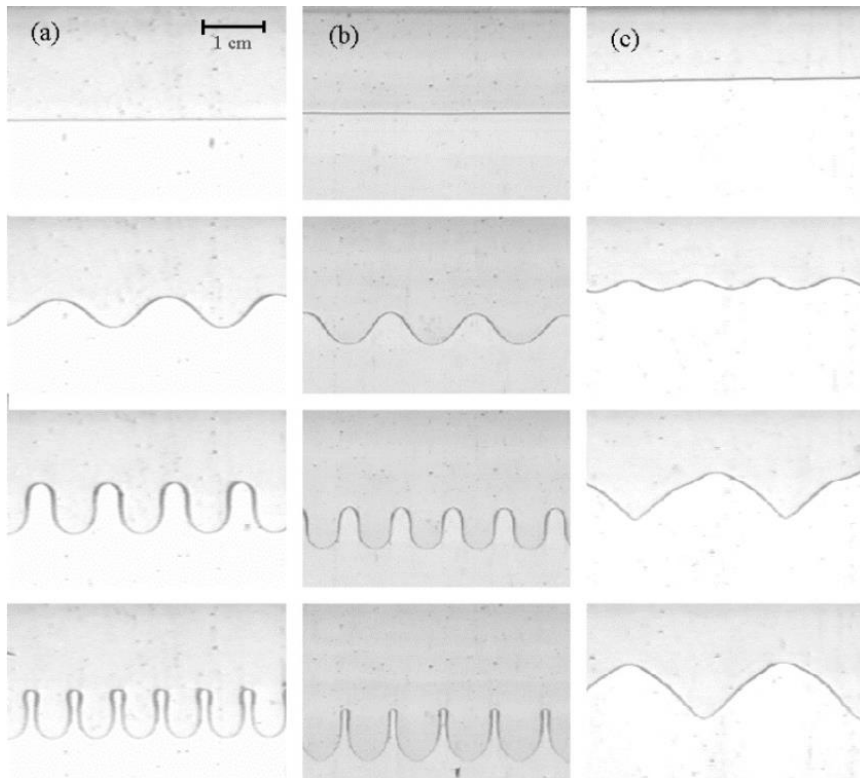
Kuva 15 virheetön maalipinta (stable uniform film) saadaan aikaan parametrien ollessa vinorasteroidulla alueella, joka saavutetaan pienillä kapillaariluvuilla (capillary number) tai sopivasti valitulla telanopeussuhteella (speed ratio). Pitkittäistä raitaa (ribbing) esiintyy telanopeussuhteen ollessa liian pieni ja kapillaariluvun ollessa kriittisen suuri. Poikittaista raitaa (cascade) esiintyy telanopeussuhteen ollessa liian suuri verrattuna optimaaliseen alueeseen ja kapillaariluvun ollessa kriittisen suuri.

Monet ovat tehneet Coyle et al. tutkimuksen pohjalta omia empiirisiä kokeitaan ja todenneet kapillaariluvun vaikutuksen pitkittäisen raidan muodostumiseen telamaalauksessa. Kobayashi päätyi samaan lopputulokseen kuin Coyle et al., mutta käyttäen kolmitelamaalauksista ja ohuempaa kalvonpaksuutta. Kobayashi kuvasi suurnopeuskameralla raitojen muodostumista tukitelan yläpuolella ja hänen tuloksensa ovat esitettyinä kuvassa 16.



Kuva 16.a) Maalauksen onnistumisen ja virheen tuottavat alueet b) suurennos pitkittäisestä raidasta [32]

Varela Lopez et. al tutki pitkittäisen raidan muodostumista meninskissä ja sen tasoittumista saaden selville, että kapillaariluku vaikuttaa merkittävästi pitkittäisen raidan muodostavan sinimuotoisen aallon syntyyn ja aallon amplitudiin. Kapillaariluvun kasvaessa aallon amplitudi kasvaa eli pitkittäinen raita vaatii pidemmän ajan tasoittua. Tasoittumista käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.5. Varela Lopez et. al suorittaman tutkimuksen tulokset on esitettyinä kuvassa 17. Kuva 17, jossa esitetyt näytteet ovat a) glyseroli, b) ksantaani ja c) PAAM. Jokaisen pienen kuvan ylempi osa rajapinnasta on ilma. [33]



Kuva 17. Pitkittäisen raidan muodostuminen eri kapillaariluvuilla [33]

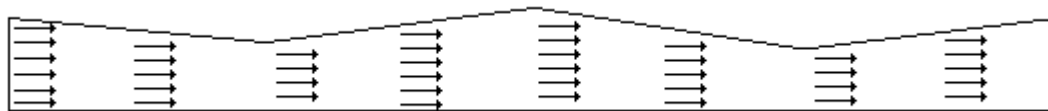
Myös Sasaki et al. tutkivat pitkittäisen raidan muodostumista ja tekivät saman johtopäätöksen kuin aiemmat tutkimukset kapillaariluvun ja telanopeussuhteen vaikutuksesta pitkittäisen raidan muodostumiseen meninskissä. Sasaki et al. suorittivat tutkimuksessaan saman kokeen kahdella erisuuruisen halkaisijan maalaustelalla nostotelan halkaisijan ollessa vakio. Kokeen tuloksena todettiin, että telojen halkaisijoista suuremmalla syntyi harvempaa raitaa kuin pienemmällä tela halkaisijalla, mutta muuten halkaisijan suuruudella ei näyttäisi olevan käytännön merkitystä telamaalauksen onnistumiseen. Tutkimuksessa todettiin, ettei siinä havaittu poikittaista raitaa kuten Coyle et al. olivat havainneet. Sasaki et al. selittivät poikittaisen raidan poissaolon kapeammalla raolla ja telojen toisiinsa puristumisella, joten niiden väliin ei pääsisi poikittaisen raidan aiheuttamaa ilmaa. [22]

4.7.2 Poikittainen raita

Poikittaisella raidalla tarkoitetaan tasaisesti maalipinnoitetun teräsnauhan pinnalla esiintyvää visuaalisesti havaittavaa kuviota, joka voi olla joko suora poikkiraita tai hieman aaltoileva kuvio, jolloin siitä käytetään nimitystä rantaviivakuvio. Poikkiraidan voi havaita helpoiten matalalla nopeudella liikkuvasta maalipinnoitetusta teräsnauhasta. Poikittaisen raidan syntyminen lähteistä esitetään eri lähteissä erilaisia näkemyksiä.

Useissa eri lähteissä [34, 35, 36] mainitaan poikittaisen raidan aiheuttajaksi telojen tai nauhan värinän tai epäkeskeiset telat, jotka aiheuttavat maalin pintaan poikittaisen rai-

dan edellä mainittujen syiden perusteella. Chandio et al. mukaan värinä syntyy meninskissä olevan paineen liikuttaessa nauhaa vertikaalisesti ja samalla väljentäen rakoa luoden oskiloivan liikkeen siihen, joka aiheuttaa poikittaisen raidan syntyä virtauksen epätasaisuuden seurauksena, mikä on esitetty kuvassa 18. [37] Edellä mainitut nimittävät poikittaista raitaa englanninkielisellä termillä *chatter*.



Kuva 18. Märkäkalvon sisäinen virtaus meninskin tulopuolella. [37]

Coyle et al., Judin ja Balzarotti et al. käyttävät poikittaisesta raidasta nimitystä englanniksi *cascade* tai *seashore pattern*. Judin tutki raportissaan poikittaisen raidan muodostumista ja on käyttänyt pääasiallisena lähteenä Coyle et al. tekemää tutkimusta pitkittäisen ja poikittaisen raidan syntymisestä, mikä myös osoittaa, että poikittainen raita ei ole pelkästään telojen värinästä aiheutuvaa virhettä. [20, 30, 38]

Judinin mukaan: ”Poikkiraitaa (eli ns. rantaviivakuviota) syntyy, kun kuljettavan filmin nopeus (märkä tela) on pienempi kuin pyyhkivän filmin (kuiva tela) ja tällöin ilmaa kulkeutuu telojen väliin alueen kapeimman kohdan yli. Tuloksena on toistuvaa aaltoilevaa poikittaista kuviota.” Meninskin pieneneminen telanopeuksien kasvaessa aiheuttaa poikkiraidan syntymisen herkkyyden lisääntymistä. [30] Myös Balzarotti et al. päätyivät samaan lopputulokseen omassa tutkimuksessaan, että ilman kulkeutuminen meninskiin aiheuttaa poikkiraitaa. [38]

Judin esittää raportissaan [30] poikittaisen raidan muodostumisen välttämiseksi pinta-maalaus koneella käytettäväksi telanopeuksien säätämistä

Judin telanopeuksien ja linjanopeuden suhteet tietyn logiikan avulla. Mittatelan nopeus on huomattavasti pienempi kuin linjanopeus, nosto- ja maalaustelojen nopeudet. Judinin mukaan on syytä tarkastella nostotelan ja maalaustelan välistä nopeussuhdetta ja maalaustelan ja linjanopeuden eli tukitelan nopeuden suhdetta maalauksen onnistumiseksi. Liuotinseosta lisäämällä tai lämpötilaa nostamalla viskoosivoimien eli viskositeetin alentaminen estäisi poikkiraidan synnyn. [30]

Sipilä on päätenyt melko samanlaiseen päätelmään kuin Judin. Sipilän mukaan poikkiraidat syntyvät telojen välisen meninskin viskoosivoimien ja pintajännityksen epätasapainosta. Epätasapaino johtuu omalta osaltaan telanopeuksien kasvamisen aiheuttamasta meninskin vetäytymistä telojen väliin ja ilman kulkeutumisesta sinne. Poikkiraidan syntymisalueen voisi määrittää niiden välinen etäisyys eli tiheämpi esiintymisväli tarkoittaisi virheen syntymistä maalaustelan ja tukitelan välissä, kun taas harvempi tarkoittaisi mitta- ja nostotelan välistä meninskiä. Sipilä esittää, että poikkiraita ja rantaviivakuviot

voitaisiin estää alentamalla telanopeuksia ja lämpötilan avulla alentaa viskositeettiä. [39]

Pynnönen esittää erikseen poikkiraidan ja rantaviivakuviolle korjaavia toimenpiteitä. Poikkiraidalle toimenpiteet olisivat telanopeuksien ja –paineiden säätäminen: telanopeuksien muuttaminen kokeillen ja telapaineen pienentäminen telojen turpoamisen liuottimen imeytymisen seurauksena. Rantaviivakuvion korjaavat toimenpiteet olisivat maa-
laus- ja nostotelan nopeuksien sovittaminen enemmän toisiaan vastaaviksi ja mittatelan nopeuden nostaminen. [15] Pynnönen on käyttänyt lähteenään Judinin ja Sipilän aiempia raportteja.

5. MAALIEN OMINAISUUDET

Maalin ominaisuudet vaikuttavat maalattavuuteen niiden reologisten ominaisuuksien kautta. Maalin reologiset ominaisuudet muodostuvat sen komponenttien yhteisvaikutuksesta ja reologialla tarkoitetaan sen muodonmuutos- ja virtausominaisuuksia. On siis tärkeää ymmärtää, miten eri komponentit liuotinpohjaisessa maalissa vaikuttavat maalin reologiaan telamaalauksessa. Kaikille tässä työssä käsiteltäville maaleille yhteistä maalattavuuden suhteen on niiden käyttäytyminen pseudoplastisesti eli leikkausohenevasti. [40, 41]

5.1 Maalin komponentit ja valmistus

Maalipinnoitteen muodostavat osat voidaan karkeasti jakaa kuiva-aineisiin ja liuottimiin. Liuottimet haihtuvat kalvonmuodostuksessa uunissa ja kuiva-aineet muodostavat pinnoitteen. Kuiva-aineen muodostavat sideaineet, pigmentit ja lisäaineet.

Jatkuvatoimisessa maalipinnoituksessa käytettävä maali valmistetaan yksittäisistä pigmenttipastoista, jotka sekoitetaan lisäaineiden kanssa dissolverissa. Sekoitettu pasta jauhetaan helmimyllyssä haluttuun jauhatusasteeseen. Jauhatuksen jälkeen pastaan lisätään liuottimet, säädetään sävy kohdalleen ja suodatetaan ennen tynnyriin varastoimista. Maalin valmistusta ohjaa valmis resepti, jossa on määritelty maalin ominaisuudet, kuten esimerkiksi väri, kiilto ja viskositeetti. [42, 43]

Telamaalauksessa maalin ominaisuuksien tunteminen on tärkeää, koska esimerkiksi viskositeetti määrittää maalin maalattavuutta suuressa määrin. Maalin koostumus vaikuttaa myös tiheyteen. Suurempi kuiva-ainepitoisuus nostaa tiheyttä, sillä liuottimet ovat pääsääntöisesti tiheydeltään pienempiä kuin maaleissa käytettävät kuiva-aineet. Maalin tiheyden tuntemista vaaditaan kalvonpaksuusmittaukseen ja sitä kautta tiheys on tärkeä suure maalauksen hallinnassa.

5.1.1 Sideaineet

Sideaine on pinnoitteessa kuivakalvon muodostava pääkomponentti, joka määrää pitkälti pinnoitteen ominaisuudet. Uunituksen aikana maalin kuivakalvon muodostuessa sideaine sitoo yhteen pinnoitteen eri komponentit eli pigmentit ja lisäaineet liuottimen haihtuttua. Pinnoitteen adheesion voimakkuuteen vaikuttaa sideaineen kyky kiinnittyä pohjamateriaalin, joka on yleensä pohjamaalattu teräsohutlevy. Sideaineen molekyylipaino vaikuttaa maalin viskositeetin muodostumiseen; mitä painavampi molekyylipaino, sitä korkeampi viskositeetti. [8, 44]

Maaleissa käytettävä polyesteri valmistetaan polykondensaatioreaktion avulla dikarboksylihapoista ja dialkoholeista. Dikarboksylihapoista voidaan käyttää esimerkiksi aromaattisia orto-, iso- tai tereftaalihappoa, tai alifaattista adipiinihappoa. Dialkoholeista usein käytetään etyleeniglykolia, neopentyyliglykolia tai heksaanidiolia. Polykondensaatio alkaa liuottimien haihtuessa ja lämpötilan noustessa uunituksen aikana. Polyesteripinnoite on kestonuovi, joka verkottuu kemiallisesti uunituksessa, ja verkottumisen eli ristisilloittumisen apuna käytetään melamiinihartsia sitomaan polyesteriketjut paremmin toisiinsa. Toinen vaihtoehto polyesterin ristisilloittamisessa on käyttää polyisosyanaatteja, joita käytetään yleisesti polyuretaanipinnoitteissa. Polyisosyanaatit muodostavat polyesteriin hydroksyyliyhdyntien kautta polyesteri-polyuretaanirakenteen. [8, 44]

Varsinaiset polyuretaanipinnoitteet valmistetaan alkoholin ja isosyanaatin välisen additioreaktion avulla, jossa kaksoissidokset aukeavat ja muodostavat polyuretaania. Polyuretaanimaalin verkottumisen ajoittamiseksi uunituksessa tapahtuvaksi, maalissa tulee käyttää verkottumista estäviä apuaineita, kuten esimerkiksi metyylietyyliketoksiimia, kaprolaktaamia tai dimetyylipyratsolia. Nämä blokkavat isosyanaatin reaktiokyvyttömäksi, mutta lämpötilan noustessa yli 100 °C vapauttavat isosyanaatin reagoimaan nopeasti ja voimakkaasti alkoholin kanssa. [8, 44]

Polyvinyylidieenifluoridipinnoitteet (PVdF) valmistetaan 1,1-difluorietaanista katalyyttisen polymerisaation avulla. PVdF-pinnoitteet ovat kestonuoveja, joiden verkottuminen tapahtuu fuusion kautta uunituksen aikana. Fuusiolla tarkoitetaan PVdF-maalin sideaineiden pintojen pehmenemistä ja yhteenliittymistä muodostaen tiiviin polymeeriverkon. Verkottumisessa apuna on usein akryylihartsia, joka edesauttaa muiden aineiden yhteen liittymistä PVdF:n muodostamaan verkkoon. Jäähdytyessään PVdF molekyylit järjestäytyvät ja muodostavat osakiteisen rakenteen. [8, 44]

Kertamuovisissa epoksinpinnoitteissa käytettävä epoksihartsin muodostuu epoksidihydritereaktiossa, jossa epikloorihydriini reagoi bisfenoli-A:n kanssa aukaisten kolmirengasrakenteen polyadditioreaktion muodostaessa sekundaarisen OH-ryhmän. Epoksin ristisilloittamisessa käytetään erityisesti uretaaniformaldehydiä, mutta myös amiineja, karboksyylihappoja ja anhydridejä voidaan käyttää. [8, 44]

5.1.2 Liuottimet

Hiilivedyt ja happea sisältävät liuottimet ovat yleisempiä maaleissa käytettävistä liuottimista. Hiilivety ja happea sisältävät liuottimet ovat herkkiä haihtumaan, sillä niillä on matala höyrystyslämpötila. Tämä omalta osaltaan vaikuttaa maalin ominaisuuksiin liuotinpitoisuuden ja kuiva-ainepitoisuuden suhteen muutoksena ja sitä kautta maalin väkevoitymisinä. [43]

Maaleissa käytettäviä liuottimia yhdistellään pinnoitekohtaisesti haluttujen maalaus- ja pinnoiteominaisuuksien aikaansaamiseksi. Liuottimet laskevat maalin viskositeettia ja siten tekevät pinnoitteen muodostavan kuiva-aineksen siirtämisen ja levittämisen teräsnauhan pintaan mahdolliseksi. Liuottimilla ja niiden sekoituksilla voidaan vaikuttaa maalin maalattavuusominaisuuksiin: juoksevuuteen, tasoittumiseen ja kovettumiseen. [43]

Liuottimet vaikuttavat eniten maalin viskositeetin ja pintajännityksen, jota ovat määrittävät maalin maalattavuutta ja tasoittumista. Liuottimien haihtumisnopeus vaikuttaa maalipinnoitteen kovettumisreaktioon uunissa. [43] Aktiivisilla liuottimilla haihtuminen kestää kauemmin, jolloin maalipinnalla on enemmän aikaa tasoittua uunituksen aikana. [42] Haihtumisnopeuteen taas vaikuttaa liuottimen lisäksi lämpötila, höyrynpaine, maalin pinta-ala-tilavuus-suhde ja ilman virtausnopeus. [39] Edellä mainittuihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa osaltaan maalausolosuhteiden säätämällä.

5.1.3 Pigmentit

Pigmentit ovat epäorgaanisia yhdisteitä, jotka ovat niukkaliukoisia liuottimeen, joten ne muodostavat yhdessä sideainehartsin kanssa maalipinnoitteen kiintoaineksen. Nykyisin pigmenttejä on saatavilla myös orgaanisina yhdisteinä. Pigmentit voidaan luokitella peittäviin, täyttäviin ja funktionaalisiin pigmentteihin, ja niitä käytetään kaikissa maaleissa. [8, 43]

Peittävät pigmentit antavat maalipinnoitteelle värin, ja eri epäorgaanisilla yhdisteillä saadaan aikaan niille ominainen väri. Pigmenttisekoituksilla voidaan säätää värisävy halutun sävyiseksi. TiO_2 eli rutiili on tärkein valkoisen värin pigmentti, jolla tiedetään olevan myös korroosion kestoa parantavia ominaisuuksia. TiO_2 kykenee myös fotokatalyysiin eli fotonien ja veden avulla se kykenee hajottamaan ja irrottamaan siihen tarttuneen orgaanisen aineksen. Hiilimusta ja musta rautaoksidi ovat tyypillisimmät mustan värin pigmentit. Ne ovat tehokkaita UV-valon absorptereita ja parantavat myös siten merkittävästi maalipinnoitteen säänkestävyyttä. Kromaattit ja lyijyoksidit ovat aiemmin olleet käytetyimpiä, mutta niiden ympäristölle ja ihmiselle haitallisuuden takia vaihtoehtoisia väripigmenttejä on kehitetty. [8, 43]

Täyttäviä pigmenttejä lisätään maaliin antamaan lisää tilavuutta maalipinnoitteelle. Karbonaatit, silikaatit ja talkki ovat tavallisia täyttäviä pigmenttejä, joita lisätään. Täyttävät pigmentit voivat myös tuoda maalipinnoitteeseen hyötyjä vain täyteaineena olemisen lisäksi. Esimerkiksi wollastoniti toimii lujitteena ja pH-puskurina maalipinnoitteessa. Maalipinnoitteessa voidaan käyttää myös muita funktionaalisia täyttäviä pigmenttejä, joilla voidaan parantaa maalipinnoitteen mekaanisia ominaisuuksia, naarmunkestävyyttä tai haponkestävyyttä. [8, 43]

Korroosion suojapigmentit ovat funktionaalisia voimakkaita oksideja, kuten kromaatteja, ja ne ehkäisevät maalipinnoitetun ohutlevyn korroosiota passivoimalla esimerkiksi naarmun paljastaman metallikerroksen luovuttamalla elektronejaan korroosiotuotteen muodostamiseen; uhrianodi. [8, 43]

Myös passivointikerroksen ja niin sanottu band gap -eron kasvattaminen onnistuvat useamman metallioksidipigmentin seoksella, mikä estää tehokkaasti elektronien kulkeutumista ja estää hapettumista. Haitallisia kromaatteja korvataan muilla mahdollisilla, kuten esimerkiksi molybdeen- tai sinkkioksidilla, sinkkifosfaatilla tai kalsiumkarbonaatilla. [8, 43]

5.1.4 Lisäaineet

Lisäaineet ovat laaja joukko aineita, joita käytetään parantamaan tiettyä ominaisuutta maalissa. Lisäaineilla saadaan esimerkiksi maali säilymään pidempään, maalautumaan paremmin ja visuaaliset ominaisuudet halutunlaisiksi. Tietyillä lisäaineilla voidaan vaikuttaa erityisesti maalin pintajännitykseen, jota yleensä alennetaan niillä. [45]

Pinta-aktiivisia aineita käytetään maalin reologisten ominaisuuksien muokkaamiseen. Maalin pigmenttien liukenemista sideaineeseen ja liuottimiin voidaan edistää dispergointiapuaineilla, jotka parantavat näin maalin tasoittumista ja vähentävät vaahdon muodostumista. Tasoittumisapuaine vähentää maalin pintajännitystä ja pienentää kontaktikulmaa eli sillä saavutetaan parempi kastuvuus. Tasoittumista edistämään voidaan käyttää muokattua polysiloksaania, polyakryyliä, hiilifluoridia tai polyakryylillä muokattua hiilifluoridia. Tasoittumisapuaine auttaa myös metallihiukkasten orientoinnissa ja estää kolojen muodostumista. Tasoittumisapuaine voi toimia myös vaahdonestoaineena, mutta varsinaisia vaahdonestoaineita käytetään myös. Vaahdonestoaine estää maalin vaahdotumisen vähentämällä kuplien muodostumista ja vapauttaa maalin sekoittamisessa siihen sekoittuneen ilman. [40, 46]

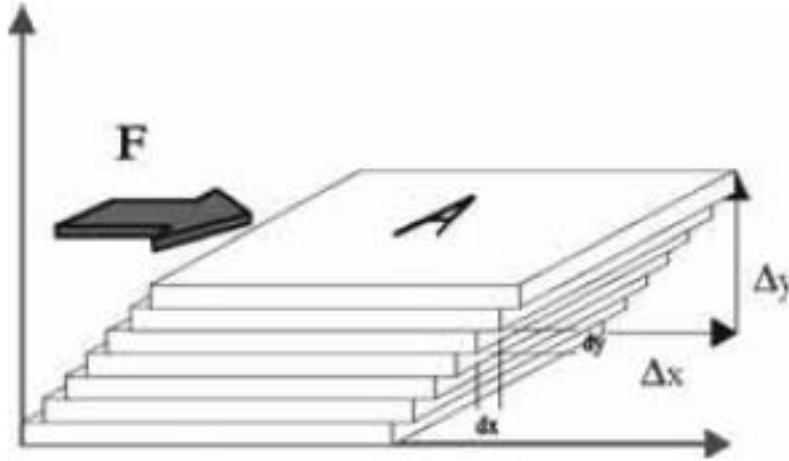
Valmiissa pinnoitteessa lisäaineilla voidaan luoda hydrofobinen, anti-mikrobinen tai palamista estävä maalipinta. [8] Maalipinnan visuaalisuuteen voidaan myös vaikuttaa erityisillä himmennysaineilla, jotka vaikuttavat erityisesti kiiltoon. Himmennysaineena voidaan käyttää piidioksidia, jonka pitoisuudella ja jauhatusasteella saadaan haluttu vaikutus maalipinnoitteeseen esimerkiksi mattapinta. [42]

Sander mainitsee myös maaleissa käytettäviksi lisäaineiksi verkottumisapuaineet, kuivavoitelu- ja liukuapuaineet, pehmittimet ja plastisointiaineet. [8]

5.2 Viskositeetti

Viskositeetti kuvaa nesteen kykyä vastustaa virtausta mekaanisen leikkauksen alaisena. Neste voidaan olettaa koostuvan monesta päällekkäisestä kerroksesta, jotka voivat liik-

kua toistensa suhteen. Tätä oletusta käytetään viskositeetin määrittämisen apuna, jonka avulla saadaan laskettua tarvittava leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden suhde. Nesteen kerroksellisuus on esitetty kuvassa 16. Kuva 19. Neste yksinkertaisessa leikkauksessa [47][47]



Kuva 19. Neste yksinkertaisessa leikkauksessa [47]

Leikkausjännitys kuvaa pinta-alaan kohdistuvaa leikkaavaa voimaa ja se voidaan laskea esitetyn mukaisesti käyttäen kaavaa

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3)$$

jossa σ on leikkausjännitys, F pintaan kohdistuva leikkaava voima ja A on pinta-ala. [44, 47] Leikkausnopeus kuvaa voiman aikaan saamaa kerrosten nopeuksien erotusta suhteessa kerrosten väliseen etäisyyteen ja se voidaan määrittää myös Kuva 19, ja olettamalla dv on voiman aikaan samaa nopeus, jolla nestetasot liukuvat toistensa suhteen kitkattomasti, kaavalla

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} = \frac{v}{y} \quad (4)$$

jossa $\dot{\gamma}$ on leikkausnopeus ja dv on nopeus, jolla on aikaansaatu dy suuruinen muutos nesteessä. [44, 47] Leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden avulla voidaan laskea dynaaminen viskositeetti η kaavalla

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}. \quad (5)$$

Viskositeetti ilmoitetaan yleensä yksiköllä $Pa \cdot s$ (pascalisekunti), mutta se voidaan myös ilmoittaa vielä yleisesti käytössä olevalla vanhalla yksiköllä P (poise). Poise ja pascalisekunti ovat muunnettavissa siten, että $1 mPa \cdot s$ vastaa $1 cP$. [44, 47]

Kun neste virtaa reiän läpi tai kapillaarissa muuttuu osa energiasta kineettiseksi energiaksi ja tällöin nesteen kykyä vastustaa virtausta leikkauksessa kutsutaan kinemaattiseksi viskositeetiksi ν , joka voidaan laskea kaavalla

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (6)$$

jossa ρ on nesteen tiheys. Kinemaattista viskositeettia voidaan soveltaa telamaalauksessa tutkittaessa maalin virtausta nipin raon lävitse. Maalausta tutkittaessa käytetään yleisesti dynaamista viskositeettia. [44, 47]

Maalin viskositeetti on sisäisestä kitkasta johtuvaa aineen virtauksen vastustuskykyä kuvaava suure. Jokainen maalin komponentti vaikuttaa omalta osaltaan maalin kokonaisviskositeettiin. Pääsääntöisesti liuottimet pienentävät maalin viskositeettia ja muut komponentit kasvattavat. Maalin viskositeetti telamaalauksessa on riippuvainen lämpötilasta ja leikkausnopeudesta eli telojen välisessä nipissä olevasta paineesta ja nipin aiheuttavien telojen pyörimisnopeudesta. Viskositeetin merkitys telamaalauksessa on suuri, sillä viskositeetti vaikuttaa maalin juoksevuuteen maalauksessa.

Telamaalauksessa syntyy myös virheitä viskositeetin suhteen. Viskositeetin ollessa pieni maalin juoksevuus on liian suurta ja tämän seurauksena voi syntyä epätasainen väri, raitaisuutta, valumista, pigmenttien kerrostumista ja ohuempi kalvo reunoille. Suuri viskositeetti tekee maalista huonosti virtaavaa ja voi aiheuttaa pin hole –ilmiön, ryppy-pintaa ja huonoa tasoittumista. [39]

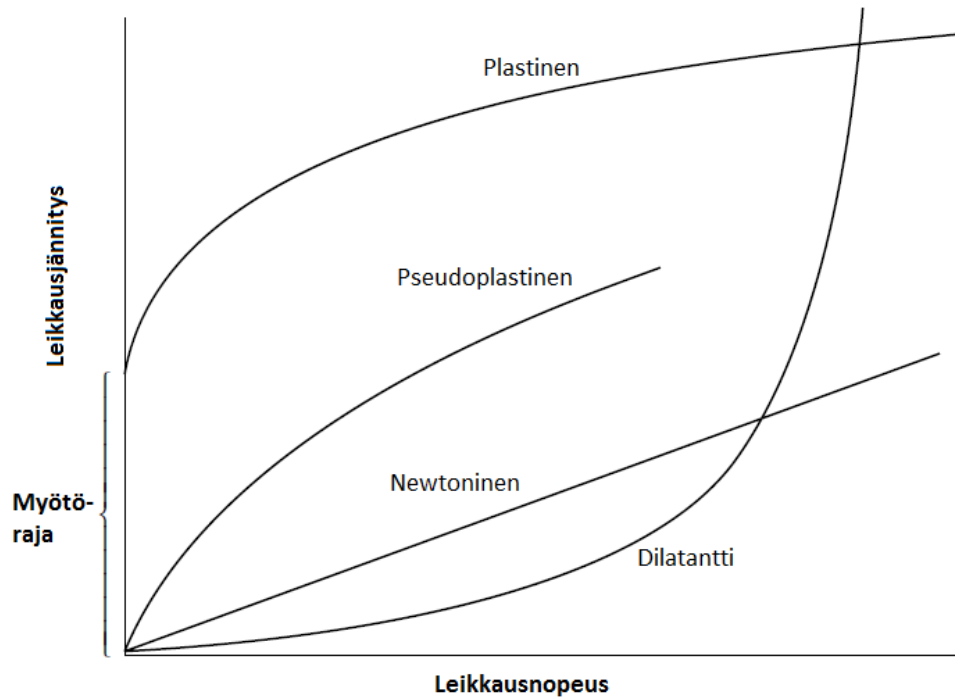
Viskositeettia voi mitata eri laitteistoilla. Maalipinnoituslinjalla on käytössä DIN 4 kuppiviskometri, jolla mitataan jokaisesta maalierästä viskositeetti sekunteina. DIN 4 kuppiviskositeetin mittausta suoritetaan nostamalla maalilla täytetty kuppi, jossa on pohjassa 4 mm halkaisijaltaan oleva reikä, sekoitetusta maalitynnyristä ja aloitetaan ajanotto sekuntikellolla. Kupin tyhjenemiseen kulunut aika on maalin viskositeetti.

Viskositeetin tarkempaan mittaukseen on kehitelty erilaisia laitteistoja, joista suosituimpia ovat Brookfield viskometrit. Viskometrillä voidaan mitata viskositeetti eri karoilla, joissa on päässä kartio tietynlaisella kulmalla. Eri karat mahdollistavat erilaisten viskositeettialueiden mittaamisen samalla viskometrillä. [41] DIN 4 ja viskometrillä mitatut viskositeetit eivät sinällään ole aivan vertailukelpoisia, mutta on olemassa muunnostaulukoita, joiden avulla niiden tuloksia voidaan verrata toisiinsa. [47]

5.2.1 Leikkauskäyttäytyminen

Käytössä olevat liuotinpohjaiset maalit ovat ei-newtonilaisia nesteitä, kun taas esimerkiksi vesi ja sen liuokset ovat newtonilaisia nesteitä. Eron newtonilaisen ja ei-newtonilaisen nesteen välille tekee sen viskositeettikäyttäytyminen leikkauksessa. [44, 47]

Ei-newtonilaisten nesteiden dynaaminen viskositeetti muuttuu leikkausjännityksen funktiona. Eri viskositeetilajit voidaan erottaa leikkausnopeuden suhteen. Eri nesteet käyttäytyvät ominaisesti leikkausjännityksen alla ja niiden käyttäytyminen voidaan erottaa neljään eri tyyppiin. [44, 47] Kuvassa 20 Kuva 20 on esitetty nesteiden käyttäytyminen leikkauksessa leikkausnopeuden funktiona.



Kuva 20. Eri nesteiden leikkauskäyttäytyminen [40]

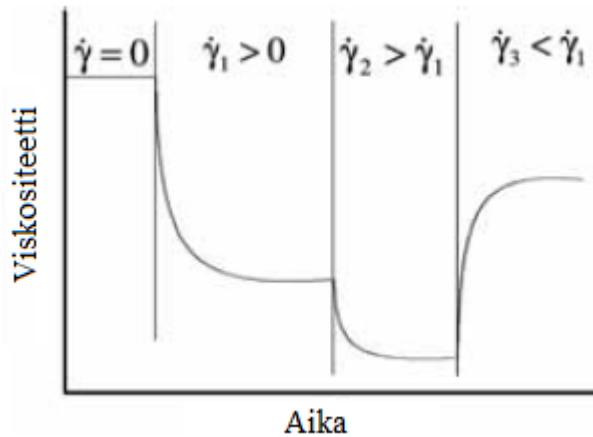
Leikkausjännitystä ja leikkausnopeutta kuvaava käyrä on lineaarinen Kuva 20 eli leikkausnopeuden kasvaessa leikkausjännitys kasvaa samassa suhteessa. Newtonlaisen nesteen viskositeetti pysyy vakiona riippumatta leikkausjännityksestä tai -nopeudesta.

Leikkausohenevan eli pseudoplastisen nesteen viskositeetti pienenee leikkausnopeuden kasvaessa. Pseudoplastisen nesteen viskositeetti riippuu voimakkaasti siitä leikkausnopeudesta, jolla sitä leikataan. Maalit ovat usein pseudoplastisia nesteitä, sillä niiden levittymisessä hyödynnetään leikkauksen aiheuttamaa viskositeetin alenemaa levittymisen parantamiseksi. Dilatantin eli leikkauspaksunevan nesteen viskositeetti kasvaa leikkausnopeuden kasvaessa. Ilmiö on päinvastainen pseudoplastiseen. Maaleille leikkauspaksunevuus ei ole toivottava ominaisuus, sillä silloin sen levittämisen aikana tapahtuva leikkautuminen johtaisi ongelmiin maalauksessa. [44, 47]

Plastisia nesteitä nimitetään usein Binghamin nesteiksi ja ne vaativat myötärajan suuruisen voiman ennen kuin ne alkavat leikkautua. Tätä myötärajaa kutsutaan myös juoksevuusrajaksi, joka kuvaa hyvin ilmiötä myötärajan ylittyessä. Kuvassa 20 Kuva 20 plastisen nesteen viskositeetti käyttäytyy kuin pseudoplastisen juoksevuusrajan ylittyttyä.

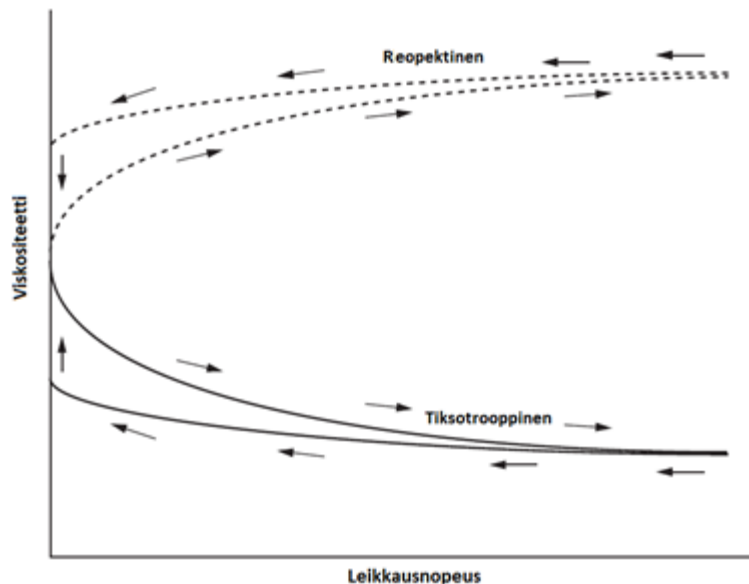
Plastinen neste voi käyttäytyä myös newtonlaisesti eli noudattaa lineaarista käyrää käyttäytymisellään. [44, 47]

Viskositeetti voi myös riippua ajasta, sillä reopektisen ja tiksotrooppisen nesteiden viskositeetit alkavat palautua leikkauksen loputtua ajan funktiona. Kuvassa 21 Kuva 21 on esitetty tiksotrooppisen nesteen viskositeetin palautuminen ajan funktiona. [41, 47]



Kuva 21. Tiksotrooppisen nesteen palautuminen ajan funktiona. [47]

Tiksotrooppiset ja reopektiset maalit muodostavat hysteresiskäyrän myös leikkausnopeuden alenemisen suhteen, kuten kuvasta 14 voi päätellä. Leikkausnopeuden aleneminen aiheuttaa palautumisen, jonka nopeus on nesteestä riippuvainen. Leikkausnopeuden muutoksen vaikutus palautumiseen on esitetty kuvassa 22 Kuva 22. [41, 44, 47]



Kuva 22. Reopektisen ja tiksotrooppisen nesteen käyttäytyminen [41]

Tiksotrooppisella nesteellä leikkaus aiheuttaa viskositeetin alenemisen pseudoplastista käyttäytymistä noudattaen. Leikkauksen loputtua sillä on siis kyky palautua leikkauksen

aiheuttamasta viskositeetin laskusta ajan myötä. Eri tiksotrooppista käyttäytymistä omaavilla nesteillä palautuminen ajan suhteen on yksilöllistä. Viskositeetti jää hieman alkuperäistä matalammaksi, mutta nousee verrattuna leikkauksen aiheuttamaan miniiniin.; hystereesikäyrä. [41, 44, 47]

Maaleissa suositetaan tiksotrooppista käyttäytymistä, sillä se vastaa pseudoplastista käyttäytymistä tärkeimmiltä osin leikkauksen suhteen levittämisen aikana. Palautumiskykyä arvostetaan maalin tasoittumisen jälkeen, jolloin ei enää maalin toivota virtaavan teräsnauhan pinnalla uunituksen aikana. [41, 44, 47]

Reopektinen maali käyttäytyy taas dilantantisti eli leikkauspaksunevasti ja palautuu ajan myötä alhaisempaan viskositeettiin, mutta joka kuitenkin jää korkeammaksi kuin alkupeäinen. Reopektisyys ei ole toivottava ominaisuus maalille, sillä se vaikeuttaa maalin levittämistä dilantanttisesta luonteesta johtuen. [41, 44, 47]

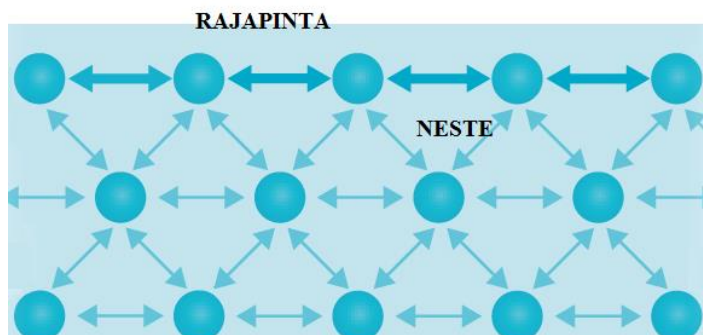
5.2.2 Lämpötilasta riippuva käyttäytyminen

Lämpötilan muutos aiheuttaa muutoksen maalin viskositeettiin. Viskositeetti alenee lämpötilan noustessa ja päinvastoin kaikilla tässä työssä tutkituilla maalityypeillä. Maalin lämpötilaan vaikuttamisella voidaan siis säätää maalin viskositeettia ja sitä kautta ominaisuuksia maalauksessa. Vakio lämpötila pitää myös maalin viskositeetin muuttumattomana. Kuitenkin on syytä muistaa, että maalia lämmittämällä alhaisemmissa lämpötiloissa haihtuvat liuottimet alkavat haihtumaan ja tätä kautta maalin viskositeetti voi nousta. [41]

5.3 Pintajännitys

Pintajännitys σ syntyy pintaenergian minimoimiseen ajavasta voimasta, jonka synnyttävät nesteessä olevat molekyyliden välisestä vuorovaikutuksesta aiheutuvat voimat. Nesteen pinnalla olevat molekyylit vetävät viereisiä molekyylejä puoleensa ja pyrkivät minimoimaan pinta-alansa, jolloin neste pyrkii vetäytymään pisaran muotoon, tämä on pisaran koossa pitävä kohesiivinen voima. Pintajännitys siis kuvaa nesteessä olevien molekyyliden välisten voimien suuruutta, joka on esitettyä kuvassa 23 Kuva 23. [40, 47]

ILMA



Kuva 23. Pintajännityksen muodostuminen molekyylien välisistä sidoksista. [48]

Pintajännitystä tulee tarkastella aina rajapintojen avulla, sillä pintajännityksen suuruuteen vaikuttavat rajapinta, lämpötila ja paine. Lämpötilan nousu laskee nesteen pintajännitystä sille ominaisen määrän. Yleisimmin tarkastelevat rajapinnat ovat neste-ilma ja neste-kiinteä aine, mitkä ovat maalin ominaisuuksien kannalta myös tärkeimmät. [40, 47] Kuvassa 23 Kuva 23 on myös esitetty ilman ja nesteen välinen rajapinta, mutta kuvasta puuttuvat ilman molekyylien ja nesteen molekyylien välisen vuorovaikutuksen esittäminen.

Maalauksessa kiinteinä rajapintoina ovat telat sekä pohjamaalattu teräsnauha. Maaleille pintajännitys on merkityksellinen tarkasteltaessa maalautuvuutta ja maalin tasoittumista. Pintajännitykseen vaikuttaa eniten maalin koostumus, erityisesti liuottimien ja apuaineiden valinta ja pitoisuudet [42].

Pintajännitys on riippuvainen lämpötilasta, sillä nesteessä olevat molekyylit liikkuvat eri lämpötilassa erilailla. Pintajännitys muuttuu lineaarisesti lämpötilan muuttuessa: alenee lämpötilan noustessa ja kasvaa lämpötilan laskiessa. Lämpötilan vaikutus pintajännitykseen tulee ottaa huomioon sitä mitatessa. Pintajännitys voidaan mitata nesteestä esimerkiksi seuraavilla menetelmillä: Wilhelmyn levyllä, Du Noüy renkaalla tai riippuvalla pisaralla. Pintajännitys ilmoitetaan dynes/cm, J/m^2 tai yleensä N/m . Pintajännityksen mittaaminen neste-kiinteä aine rajapinnoilla tapahtuu tarkastelemalla pinnan ja nestepisaran välistä kontaktikulmaa. Kontaktikulman asteluvun mukaan määritellään millainen nesteen kastuvuus on pinnan suhteen. Hyvä kastuvuus tapahtuu $0-90^\circ$ kulmilla, kun taas huono kastuvuus ilmenee sitä suuremmilla. [40, 47]

5.4 Kapillaariluku

Kapillaariluku on kirjallisuudessa esiintyvä dimensioton suure, jolla kuvataan maalauksen onnistumisen vakautta maalinominaisuuksien ja telanopeuden avulla. Kapillaariluku on siis laskennallinen suure, joka lasketaan kaavalla

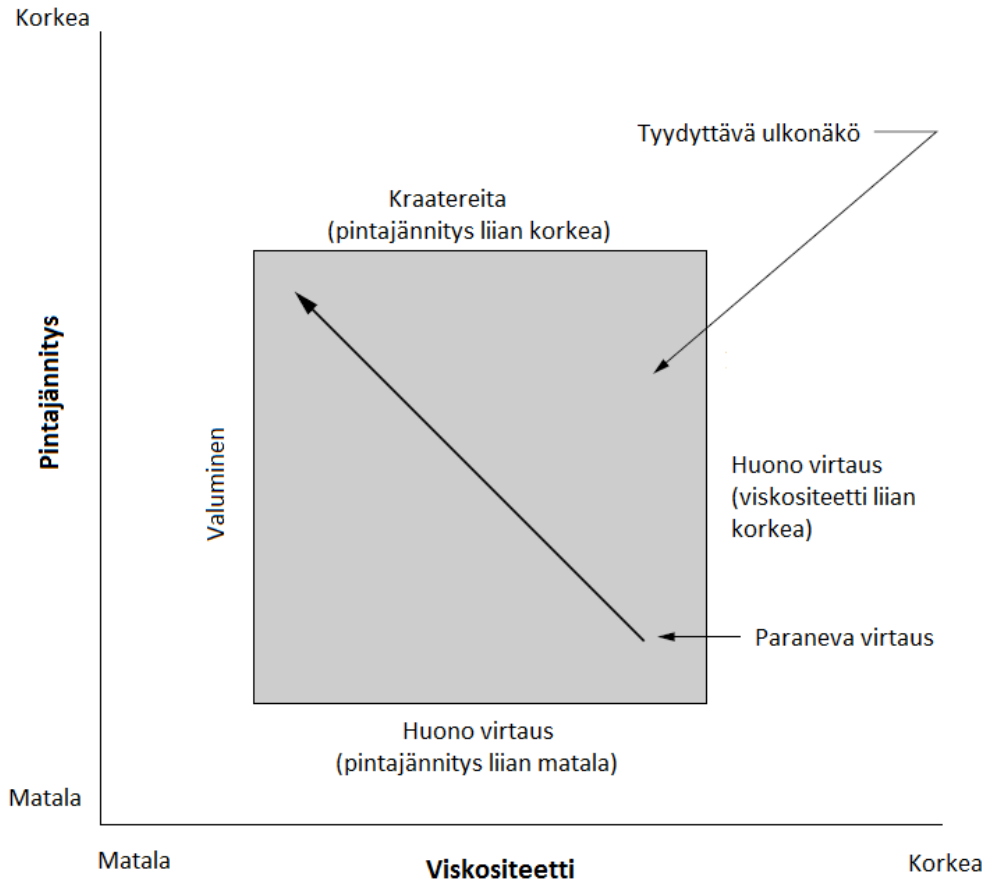
$$Ca = \frac{\mu}{\sigma} V, \quad (7)$$

jossa μ on maalin viskositeetti, σ maalin pintajännitys ja V on maalaustelan nopeus. [20]

Kappaleessa 4.7 esitettyt tutkijat ovat käyttäneet kapillaarilukua tutkimuksensa apuvälineenä tutkiessaan telamaalauksen virheiden syntymistä erilaisilla telamaalauskonstruktioilla ja maaleilla. Kapillaarilukua voisi luonnehtia parametriksi, jonka kriittisellä arvolla tietyllä laitteistolla ja telanopeuksilla voidaan ennustaa pitkittäisen ja poikittaisen raidan muodostumista

Kapillaariluku kuvaa ensisijaisesti maalin maalaukseen liittyviä ominaisuuksia pintajännityksen ja viskositeetin suhteella, mutta se liittyy samalla maalin ominaisuuksiin myös telamaalauksen telanopeuden. Telamaalauksen nopeus oletetaan koejärjestelyissä yleensä vakioksi, mutta nopeuden muutos omalta osaltaan vaikuttaa nostavasti tai laskevasti kapillaarilukuun. Esimerkiksi maalauksen tehokkuuden lisäämiseksi pyritään nostamaan linja- ja telanopeutta, jolloin myös kapillaariluku kasvaa, milloin kasvua pitää kompensoida muuttamalla maalin ominaisuuksia, että kapillaariluku säilyy visuaalisesti moitteettoman maalauksen tuottavalla alueella.

Maalin ominaisuuksista pintajännityksen ja viskositeetin välillä on oltava tasapaino kapillaariluvun perusteella. Tasapainon merkitys maalaukseen ja maalipinnan visuaaliseen ulkonäköön on esitetty kuvassa 24 Kuva 24.



Kuva 24. Pintajännityksen ja viskositeetin suhde maalipinnan ulkonäköön. [40]

5.5 Tasoittuminen

Tasoittuminen alkaa välittömästi maalaustelan siirrettyä maali teräsnauhan pinnalle. Pohjamaalatun teräsnauhan pinnalla maali virtaa spontaanisti ja kostuttaa pinnan. Kostumisnopeutta voidaan kuvata nopeusfunktiolla

$$Kostumisnopeus = \frac{k \gamma \cos \theta}{2\eta}, \quad (8)$$

jossa k on vakio, γ pintajännitys, θ kastumiskulma ja η viskositeetti. Pintajännitys toimii ajavana voimana pinnan kostumisessa, kun taas korkea viskositeetti hillitsee kastumista. Kuitenkaan pintajännitystä ei voi nostaa määräänsä enempää, sillä muuten siitä voi seurata muita virheitä kuin pinnoitteen huono kastuminen ja siitä johtuvat virheet. [49]

Tasoittuminen tapahtuu siis telamaalauksen jälkeen ennen uunitusta, mutta osittain myös sen aikana. Haihtuvat liuottimet luovat maalin märkäkalvolle pintajännitysgradientteja, joiden vaikutuksesta maalin tasoittuminen on huonoa tai siihen voi syntyä virheitä. Maalin tasoittumisella tarkoitetaan maalin pinnan tasaantumista erilaisista pyörteistä ja virtauksista, mutta erityisesti sinimuotoisesta aaltoliikkeestä, jonka maala-

us ja pintajännitysgradientit siihen aiheuttavat. Maalin tasoittumiseen voi vaikuttaa seuraavilla toimenpiteillä:

- pidentämällä uuniaikaa eli alentamalla linjan ajonopeutta
- nostamalla kalvonpaksuutta
- laskemalla maalin viskositeettia
- nostamalla maalin pintajännitystä
- pienentämällä maalin aaltoilua

Linjan ajonopeuden alentaminen ja kalvonpaksuuden lisäys eivät ole mahdollisia vaihtoehtoja linjan tuottavuuden ja asiakkaille luvatus kalvonpaksuuden takia, mutta muut vaihtoehdot ovat vartenotettavia maalin tasoittumisen edesauttamiseksi. Maalin viskositeetin ja pintajännityksen muuttaminen ovat verrattain yksinkertaisia toimenpiteitä ja helposti todennettavissa mittausmenetelmin. Aaltoliikkeessä olevien harjanteiden välinen etäisyys eli aaltoilun aallonpituuden pienentäminen parantaisi tasoittumista, mutta sen todentaminen on hankalaa. Aallonpituuden selvittäminen olisi kuitenkin tärkeää, sillä sen vaikutus tasoittumiseen on suuri, kuten nähdään kaavan 9 neljänneistä potenssista. [40, 41]

$$T_{1/2} \propto \frac{\eta L \lambda^4}{\sigma h^3}, \quad (9)$$

jossa

$T_{1/2}$ = tasoittumisaika

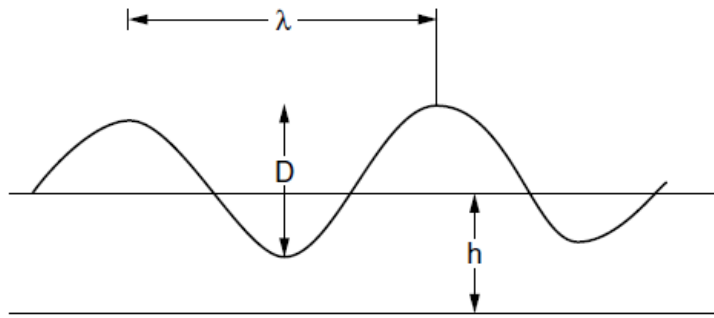
ηL = maalin viskositeetti (matalalla leikkausnopeudella)

λ = aallonpituus

σ = maalin pintajännitys

h = märkäkalvon paksuus

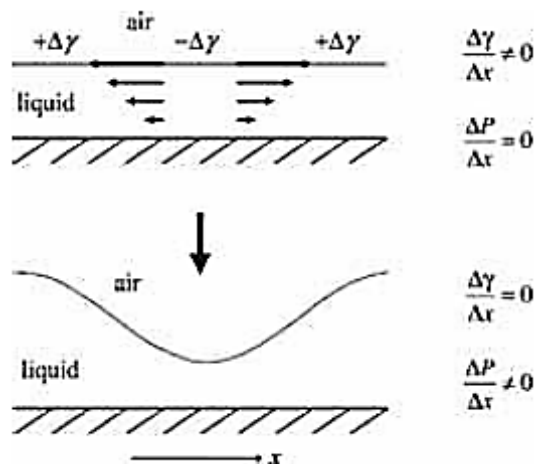
Tasoittumista vaativaa aallon amplitudin korkeus on esitetty kuvassa 17 Kuva 17, jossa on osoitettu kapillaariluvun vaikutus amplitudiin ja tasoittumisen vaatimukseen. Aiemmin esitetystä kuvasta 17 voidaan huomata, miten suuri vaikutus viskositeetilla ja pintajännityksellä on amplitudin muodostumiseen ja myös yhteys kaavan 11 mukaiseen tasoittumiseen. [40, 41] Kuvassa 25 on esitettynä laskentaan tarvittavat sinimuotoisen aallon muodostavat tekijät.



Kuva 25. Maalin märkäkalvon pinnan sinimuotoinen aaltoliike. [41]

Kuvassa 25 D on amplitudi eli aallonkorkeus, aallonpituus λ on harjanteiden välinen etäisyys ja h märkäkalvon paksuus. Tasoittumisen tavoitteena ideaalilanteessa olisi siis ajaa amplitudihuiput minimiin eli nolla-arvoon, jolloin niiden taso olisi sama kuin märkäkalvon taso ja maali olisi täysin tasoittunut. Todellisuudessa pyritään maalipinnan hyvään visuaaliseen ulkonäköön, joka vaatii riittävän tasoittumisen eli se ei vaadi täydellistä tasoittumista. Tietyillä maaleilla tavoitellaan kuivakalvon sopivaa poimuttumista halutun pintarakenteen aikaansaamiseksi.

Tasoittumista siis vastustaa korkea viskositeetti ja suuri amplitudi, mutta myös pintajännitysgradienttien virtaus voi vastustaa tasoittumista. Pintajännitysgradientit voivat aiheuttaa tasoittumista hidastavan joustoliikkeen, joka aiheuttaa karhean pinnan muodostumisen. Tätä kutsutaan Marangoni-ilmiöksi, joka omalta osaltaan siis ajaa sekä vastustaa tasoittumista. Myös maalin viskoelastisuus vaikuttaa tasoittumiseen kaksijakoisesti: ajamalla tasoittumista pintajännitysgradienttien läsnä ollessa tai hidastamalla tasoittumista ilman pintajännitysgradientteja. [47] Pintajännitysgradienttien $\Delta\gamma$ aiheuttama tasoittumista vastustava ilmiö on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Marangoni-ilmiö vastustaa tasoittumista [47]

6. MITTAUKSET

6.1 Maalin ominaisuudet

Maalin ominaisuuksista valittiin mitattavaksi viskositeetti ja pintajännitys, koska niiden mittaaminen oli helposti mahdollista olemassa olevien puitteiden ansiosta. Myös niiden huomattava vaikutus telamaalaukseen teoriapohjan perusteella ohjasi valinnassa. Viskositeetin ja pintajännityksen lisäksi mittauksien perusteella laskettiin mitatuille maaleille kapillaariluvut.

Mitattavia näytteitä kerättiin Hämeenlinnan maalipinnoituslinjan tuotannosta lokamarraskuun välisenä aikana. Edustavaksi otokseksi valikoitui joukko erivärisiä polyesteripohjaisia maaleja, joille mittaukset suoritettiin. Maalintoimittaja toimitti kokeisiin myös ominaisuuksiltaan muokattuja maalieriä, joiden uskottiin toimivan paremman linjalla. Muokattuja maaleja kutsutaan koeajomaaleiksi ja muista maaleista käytetään nimitystä tuotantomaali, koska ne ovat tällä hetkellä käytettyjä maaleja Hämeenlinnan maalipinnoituslinjan tuotannossa.

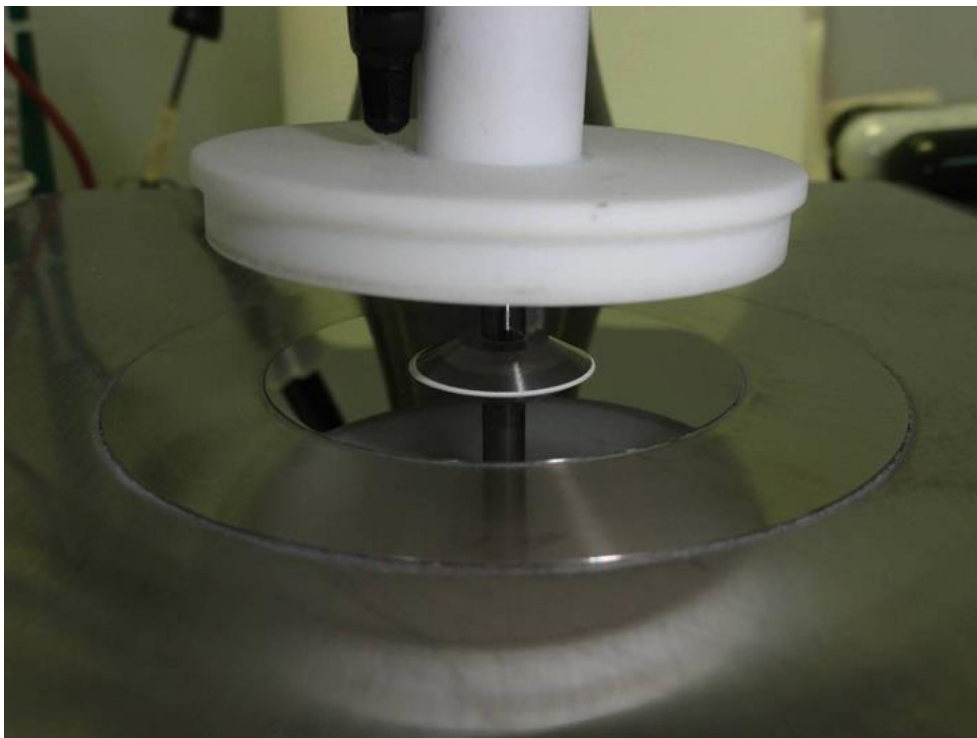
6.1.1 Viskositeetti

Maalinäytteistä mitattiin viskositeetit Hämeenlinnassa kehityslaboratorion Brookfield-viskometrillä. Brookfield Viscometer CAP-2000+ on kartio-levy-tyyppinen viskometri ja sillä voidaan mitata nesteiden viskositeetteja 5-1000 RPM nopeudella ja 5-75 °C lämpötila-alueella. CAP-2000+ on varustettu lämpölevyllä ja tehokkaalla korkean leikkausnopeuden takaavalla sähkömoottorilla. Mittauksissa käytetty viskometri on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Brookfield Viscometer CAP 2000+ [50]

Maalia sekoitettiin 10 min ennen näytteenottoa ja koko ajan alemmalla nopeudella koko mittaustilaisuuden ajan. Maalin näytekokoo oli 24 mikrolitraa ja sen mittaamiseen käytettiin ennestään vakiintunutta menetelmää. Tämän työn viskositeettimittauksiin käytettiin CAP03 -kartiokaraa, jolla on mahdollista mitata viskositeetti leikkausnopeuden $66\text{--}13333\text{ s}^{-1}$ alueella. Mittaukset suoritettiin vetokaapissa maaleista haihtuvien liuottimien haittojen ehkäisemiseksi, vaikka mittauksien ajan käytettiin liuottimien haihtumisen ehkäisemiseen tarkoitettua valkoista suojusta (solvent trap, liuotinsuoja). Viskometriä ohjattiin tietokoneelle asennetulla ohjelmalla, jota käyttäen mittauksien ajo-ohjelmat luotiin. Viskometri kara alhaalla maalinäyte asetettuna mittausvalmiina ja liuotinsuoja ovat esitettyinä kuvassa 28 Kuva 28.



Kuva 28. Viskometri liuotinsuojan laskemista vaille valmiina mittaamaan valkoista maalinäytettä. [50]

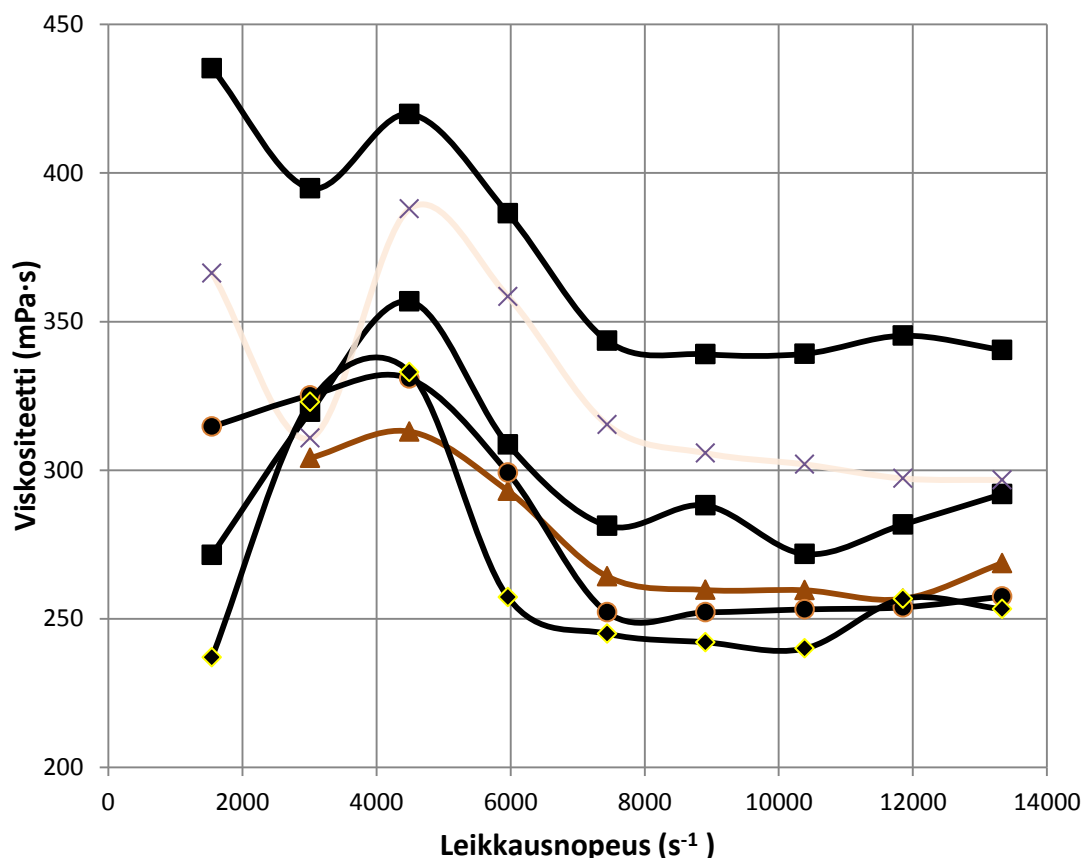
Viskositeettia mitatessa epävarmuustekijöiksi muodostuivat vetokaapin jatkuva veto, liuotinsuojan jarruttava vaikutus, maalinäytteen tarkka koko, maalinäytteen tarkka asetaminen, liuotinsuojan pitävyys, liuottimien haihtuminen pitkissä mittauksissa ja maalinäytteen pieni määrä. Viskositeetti mitattiin 3 kertaa per näyte per ajo-ohjelma. Suurempi mittausten määrä mahdollistaisi paremman luotettavuuden mittauksille. Viskositeettimittaukset ovat jatkossa helposti toistettavissa, sillä ajo-ohjelmat ovat tallennettuna viskometriä ohjaavaan tietokoneohjelmaan. Viskositeettimittaukset suoritettiin huolella ja mittausepävarmuustekijät tunnistettiin, joten mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina ja käyttökelpoisina tämän työn osalta.

Viskositeetin suhteen mittauksia tehtiin kaksi erilaista. Ensimmäisessä viskositeettimittauksessa tutkittiin maalien käyttäytymistä leikkausnopeuden suhteen. Viskometriä ohjaavalla tietokoneohjelmalla luotiin nouseva leikkausnopeus ajo-ohjelma, jonka aikana lämpötila pidetään vakiona. Ajo-ohjelman tiedot on esitetty taulukossa 1 Taulukko 1.

Taulukko 1. Viskositeetin mittaus nousevalla leikkausnopeudella ajo-ohjelman arvot

Mittauspiste	Kierrosnopeus (rpm)	Leikkausnopeus (1/sec)	Pitoaika (s)	Lämpötila (°C)
1	5	66.66	2	20
2	116	1547	2	20
3	226	3013	2	20
4	337	4493	2	20
5	447	5960	2	20
6	558	7440	2	20
7	668	8907	2	20
8	779	10387	2	20
9	889	11853	2	20
10	1000	13333	2	20

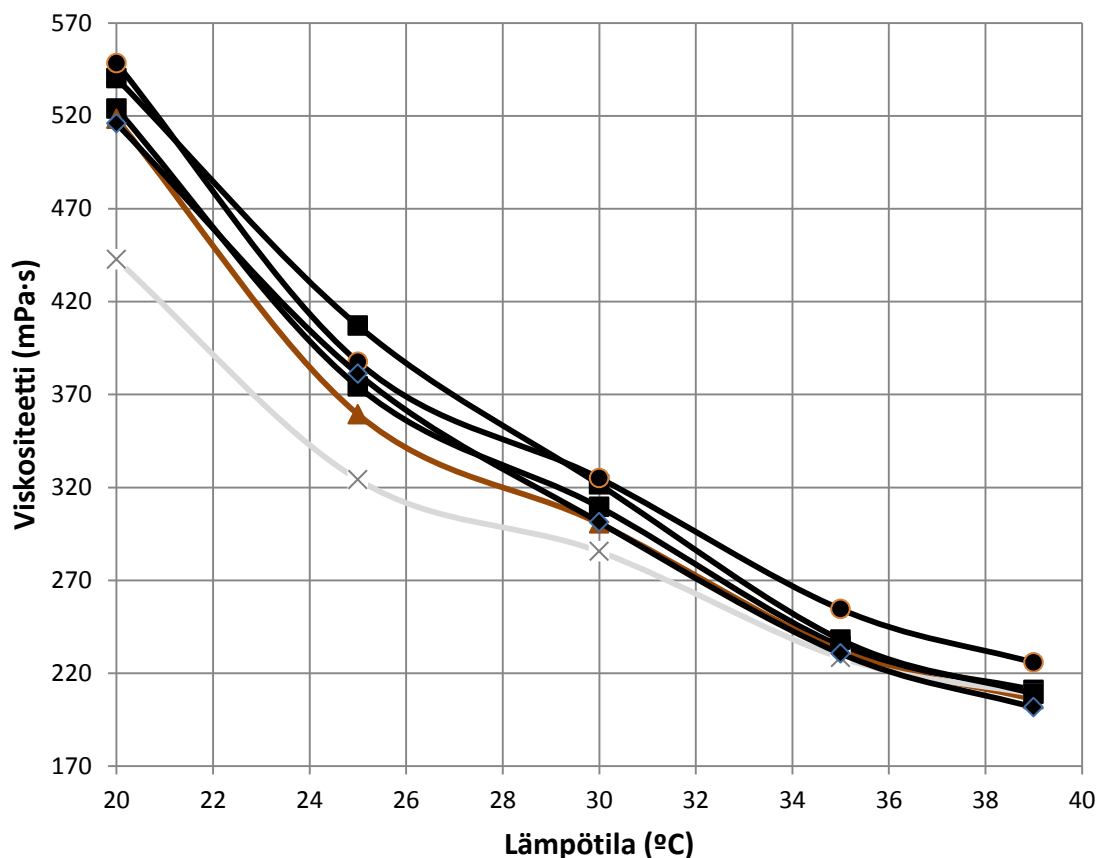
Ajo-ohjelmassa käytettiin vakio lämpötilaa ja pitoaikaa, jolla tarkoitetaan yksittäisessä mittauspisteessä eli kierrosnopeudessa pidettyä mittausaikaa. Leikkausnopeus nousi jokaisella mittauspisteellä tasaisin välein aina maksimileikkaukseen asti taulukon 2Taulukko 1 mukaisesti. Viskositeetin muutos leikkausnopeuden suhteen on esitetty kuvassa 29Kuva 29.



Kuva 29. Viskositeetin muutos leikkausnopeuden funktiona

Kuvasta 29 Kuva 29 voidaan nähdä, että kaikki tutkitut maalit leikkautuvat $4000\text{--}7500\text{ s}^{-1}$ välillä. Mittauksien alussa on tuloksien suhteen epäloogisuutta ja epävakautta, johtuen kiihdytyksen aiheuttamasta nykimisestä, joka aiheuttaa maalin suuremman leikkaantumisen kuin todellisuudessa tapahtuukaan. Luotettavat mittaustulokset alkavat 4000 s^{-1} mittauspisteen kohdalta. Yli 7500 s^{-1} leikkausnopeudella maalit eivät enää leikkaannu ja viskositeetit tasaantuvat yksilöllisiin arvoihinsa. Lopussa osan maaleista viskositeetti alkaa nousta ja mikä johtuu liuottimien haihtumisesta.

Maalien viskositeetin käyttäytyminen lämpötilan suhteen mitattiin erillisellä ajo-ohjelmalla, johon asetettiin leikkausnopeus vakioarvoon 10667 s^{-1} eli kierrosnopeudeksi 800 RPM. Lämpötila asetettiin muuttumaan mittauksen aikana 20 °C asteesta 40 °C asteeseen. Viskositeetin muutos lämpötilan funktiona vakioleikkausnopeudessa on esitetty kuvassa 30 Kuva 30.



Kuva 30. Viskositeetin muutos lämpötilan funktiona

Kaikkien maalien viskositeetti aleni johdonmukaisesti lämpötilan funktiona. Maalinäytteenä riippuen viskositeetin alenemisnopeus oli yksilökohtaista, mikä johtuu maalin ominaisuuksista. Mittaus sykli oli kyllin nopea, etteivät liuottimet ehtineet haihtua häiritsevissä määrin.

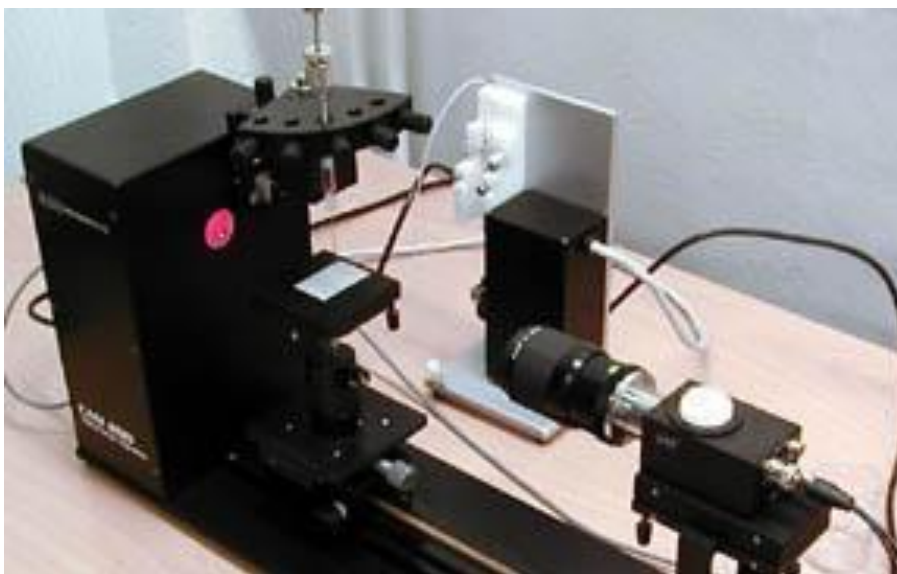
6.1.2 Pintajännitys

Maalien pintajännitykset mitattiin Top Analytican laboratoriossa Turussa. Mittaukseen käytettiin KSV CAM 200 –laitteistoa, jolla on mahdollista määrittää kiinteiden ja nesteiden pintaenergioita ja kastumiskulmia sekä tehdä adheesiotutkimuksia [51]. Top Analytican mukaan:

”Kastumiskulmalaitetta käytetään kiinteän- ja nestefaasin vuorovaikutuksen havainnollistamiseksi. Laitteella voidaan määrittää nestepinnan pintajännitys, dynaamisia kastumiskulmia, ajasta riippuvaisia kastumisreaktioita sekä pintaenergioita.

Pisaran ja näytteen pinnan välistä kastumiskulmaa mitataan ajan funktiona. Näytteen pinnan kokonaispintaenergia voidaan laskea, jos kastumiskulma on mitattu käyttäen nesteitä, joiden ominaisuudet tunnetaan.” [51]

Pintajännityksen mittaukseen käytetty laitteisto on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. KSV CAM 200 [51]

Laitteistoon kuuluu teline, johon asennetaan CCD-kamera, valolähde ja pipettiteline. Telineessä on kisko, jonka avulla voidaan säätää kameran etäisyyttä ja tarkentaa näkymä näytealustalle. Kamera on liitetty tietokoneeseen, jolla suoritetaan varsinainen kuvas mittausohjelmalla. Näytealusta on telineessä valolähteen etupuolella ja sille pudotetaan pipetillä näytepisarat kastumiskulmamittauksessa. Pipettinä käytetään mikropipettiä, jota voidaan kiertää ja säätää tarkasti ulostyöntyvän nesteen määrää.

Pintajännityksen mittaukseen käytettiin riippuvan pisaran menetelmää (pendant drop). Nimensä mukaisesti menetelmässä työnnetään pipetistä ulos pisara, jonka tulee olla mahdollisimman iso ja riippua pipetin kärjessä siinä putoamatta. Tällöin voidaan suorittaa pisaran analysointi mittausohjelman avustuksella, joka laskee automaattisesti pisaran koon ja tilavuuden. Pisaran mittaukseen tarvitaan tietää mitattavan nesteen tiheys, jonka avulla on mahdollista määrittää pisaran koon ja tilavuuden perusteella sen massa, jota tarvitaan pintajännityksen laskentaan. Mittausohjelma laskee pisaraan koon automaattisesti Young-Laplacen yhtälöä käyttämällä. [52]

Pintajännitykset mitattiin 25 °C lämpötilassa. Pintajännitykset mitattiin maalinäytteistä 5 mittausta per näyte ja näistä laskettiin keskiarvo (ilmoitetaan pintajännityksen arvona) ja keskihajonta.

Pintajännityksen mittaukseen liittyviä epävarmuustekijöitä ovat: maalin tiheyden tarkka lukema, maalipisaran koko neulan kärjessä, maalipisaran maksimaalinen koko ennen putoamista, pipetin kunto, ilmastointi ja systemaattinen virhe laskennassa. Näistä tekijöistä huolimatta pintajännityksen mittausta riippuvan pisaran menetelmällä voidaan pitää luotettavana menetelmänä ja toistettavissa olevana. Mittauksien määrää kasvattamalla voidaan parantaa tulosten luotettavuutta ja toistettavuutta. Myös eri lämpötiloissa

mittaaminen toisi mahdollisuuden laskea pintajännitykselle lämpötilakorjauskertoimen arvo jokaiselle tutkittavalle näytteelle.

6.1.3 Kapillaarilukujen laskenta

Mitattujen viskositeetin ja pintajännityksen perusteella voidaan laskea maaleille kapillaariluku eli Ca. Kapillaariluvun laskennassa käytetään kappaleessa 5.4 esitettyä kaavaa 7. Kapillaariluvun laskennassa käytettiin telanopeuden arvona maalaustelan nopeutta käännetyillä telanopeuksilla. Maalinäytteille lasketut kapillaariluvut ovat esitetty taulukossa 2 Taulukko 2.

Taulukko 2. Kapillaariluvun laskentaan käytetyt arvot.

Maalin näytenumero	Kapillaariluku (Ca)
1	1.15
2	1.15
3	1.04
4	1.24
5	1.26
6	1.14

Viskositeetit ja pintajännitykset ovat mittausarvoja 25 °C asteen lämpötilassa eli kapillaariluku on käypä vain mainitussa lämpötilassa. Maalinäytteiden viskositeetti ja pintajännityserojen ollessa pieniä, mutta kapillaariluvun laskennassa erot korostuvat ja muuttuvat merkityksellisiksi. Kapillaariluvun laskennassa kertautuvat kaikki viskositeetti- ja pintajännitysmittauksen epävarmuus- ja mittatarkkuustekijät kapillaariluvulle.

Lasketut kapillaariluvut ovat aina erä- ja maalikohtaisia eikä niitä ole sinänsä mielekäästä verrata kirjallisuuden lukuarvoihin, vaikka ne olisivatkin melko vastaavat. Kirjallisuudessa esitetyt kapillaarilukujen arvot ovat usein yksinkertaistettuja liuoksia, joissa on vain kaksi osaa; esimerkiksi vesi ja tärkkelys [20]. Monet kirjallisuudessa tutkituista nesteistä ovat newtonilaisia nesteitä tai vain yhtä liuotinta sisältää liuosta. Todellisuudessa maalit sisältävät paljon erilaisia komponentteja, jotka vaikuttavat eri tavoin maalin ominaisuuksiin.

7. KOEAJO

Tähän diplomityöhön liittyvä koeajo suoritettiin Hämeenlinnan maalipinnoituslinjalla 13.11.2015. Koeajon tutkimuksen kohteena oli selvittää maalin ominaisuuksien suhteen muutetun maalin maalautuvuutta telanopeuksien säätämisellä. Tavoitteena oli todentaa kirjallisuudessa esitetty arvio kapillaariluvun, joka lasketaan viskositeetin ja pintajännityksen avulla, vaikutus telamaalauksen onnistumiseen, kun maalin ominaisuuksia muutetaan reseptiä muokkaamalla. Kuivakalvon paksuus säilytettiin koko koeajon vakiona.

Maalin ominaisuuden muutos antaa laajemman alueen maalaus koneen rajallisten säätöjen suhteen maalauksen onnistumiseen vaikuttamisessa. Koeajossa olosuhteet säilytettiin vakioina: maalin sekoitus, maalin pyöritys teloilla ja samaa maalauskonetta käytettiin molemmille koeajoille. Maalin lämpötila ja sitä kautta viskositeetti muuttui hieman koeajon aikana, mutta ei merkittävästi. Koeajokelojen tiedot ovat taulukossa 3Taulukko 3.

Taulukko 3. Koeajossa käytettyjen kelojen tiedot.

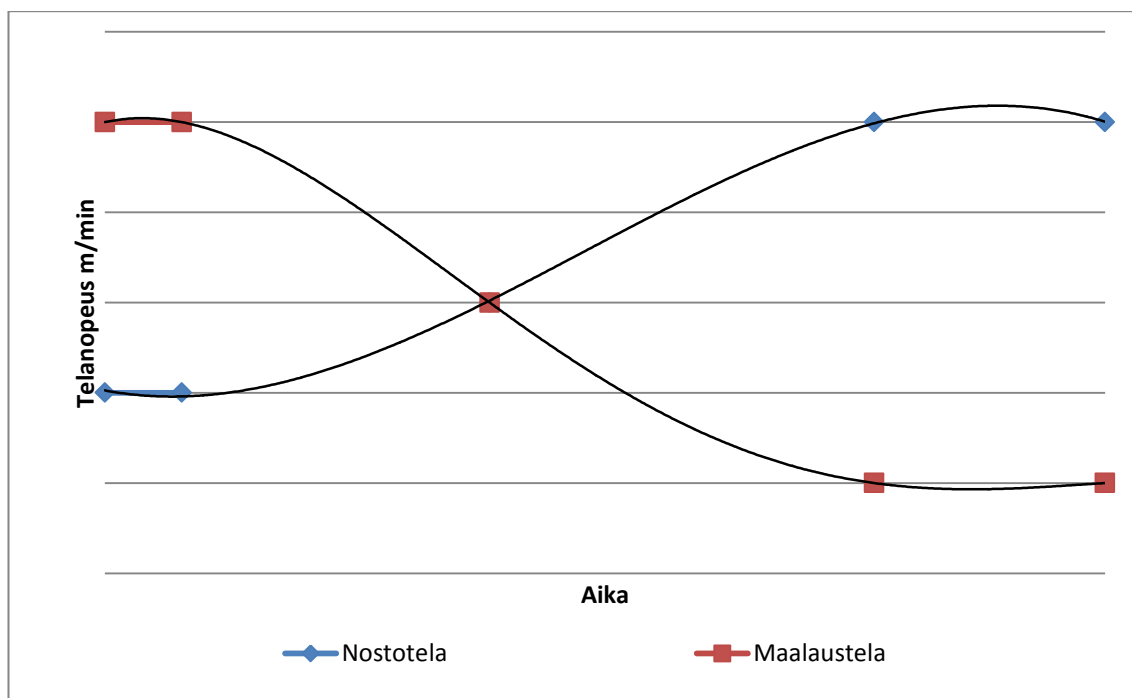
Paksuus (mm)	Leveys (mm)
0,5	1230
0,45	1250
0,45	1250

Koeajossa käytetyt kelat, ja pintamaalit ja niiden eränumerot ovat esitetty taulukossa 4Taulukko 4.

Taulukko 4. Koeajossa käytettyjen maalien nimittäminen

Maalinäytteen numero	Nimitys
1	Tuotantomaali
2	Koeajomaali 1
3	Koeajomaali 2

Koeajo ajettiin suuremman mustan polyesterin tuotantoerän yhteydessä. Koeajoa ennen ja jälkeen olleessa tuotantoajossa poikittaista raitaa ilmeni, kun käytettiin normaaleja telanopeuksia sekä käännettyjä telanopeuksia kalvonpaksuuden ollessa tähtäyksen mukaisesti vakiona. Koeajosykli eteni normaaleista telanopeuksista tasapainossa olevien kautta käännettyihin telanopeuksiin. Koeajosykli on esitettyä kuvassa 32 Kuva 32 suhteellisen ajan funktiona maalaus- ja nostotelan nopeuksiin.



Kuva 32. Koeajosyklin kulku.

Ennen koeajokeloa tuotannossa olevalle nauhalle kokeiltiin telanopeuksien säädön hallintaa ja kalvonpaksuuden vakiona säilyttämistä koeajosuunnitelman mukaisesti, mikä onnistui erinomaisesti. Koeajosyklin säätäminen onnistui maalarin ammattitaidon ansiosta erinomaisesti samanaikaisesti muuttamalla askel kerrallaan yksittäistä telanopeutta ja samalla säätäen askel kerrallaan mittatelan puristusta kalvonpaksuuden vakiona säilyttämiseksi. Tuotantomaalilla maalattu kela on tämän koeajon referenssi.

Koeajossa mukana olleiden kelojen visuaalinen ulkonäkö kuvattiin videolle ennen lopupään leikkuria myöhempää tarkastelua varten. Ajettujen kelojen visuaalista ulkonäköä tarkasteltiin koko koeajon ajan maalaamossa ja videokuvauspaikalla sekä pinnoittajan tasolla. Kuten on todettu jo aiemmin, poikittaista raitaa on vaikea erottaa paikallaan olevasta nauhasta ja myös poikkiraidan erottaminen yksittäisestä kuvasta on hankalaa. Tässä työssä esitettävät kuvat ovat videotarkastelun perusteella valittuja ja niissä osoitettut virhekohdat niihin merkittyjä.

7.1 Referenssi

Tuotantomaalireferenssin ajoa ennen oli jo esiintynyt edellisillä keloilla poikittaista raitaa. Ajon alussa referenssiä ajettaessa esiintyi myös poikittaista raitaa koeajosyklin mukaisilla telanopeuksilla maalaustelan nopeuden ollessa korkeampi ja nostotelan nopeuden ollessa matalampi. Telanopeussuhteiden ollessa yhtä suuret eli nosto- ja maalaustelan nopeuksien ollessa samat muuttui maalaamossa maalattu pinta samettimaiseksi, mutta se ei parantanut pinnoittajan tasolla havaittua maalatun nauhan pintaa, vaan siinä esiintyi edelleen poikittaista raitaa, mutta lievemmin kuin alussa. Tuotantomaalilla maalatun referenssin alussa havaittu poikittainen raita on esitetty kuvassa 33 Kuva 33.



Kuva 33. Koeajosyklillä ajatun tuotantomaalilla pinnoitetun kelan alussa esiintyvä poikittainen raita.

Referenssin lopussa, kun telanopeudet olivat päinvastaisiksi käännetty, oli maalattu pinta edelleen poikkiraitainen. Maalaria pyydettiin muuttamaan maalaustelan nopeutta mielensä mukaisesti siten, että maalatulla pinnalla ei esiintyisi poikittaista raitaa. Maalari nosti maalaustelan nopeuden askelittain, mutta poikittaista raitaa esiintyi koko tämän ajan. Kuitenkin pinnoittajan tasolla arvioitiin maalatun pinnan parantuneen hieman verrattuna alkuasetelmaan, puolivälin asetelmaan ja koeajosyklin loppu telanopeuksiin, poikittaisen raidan jatkuvasta esiintymisestä huolimatta.

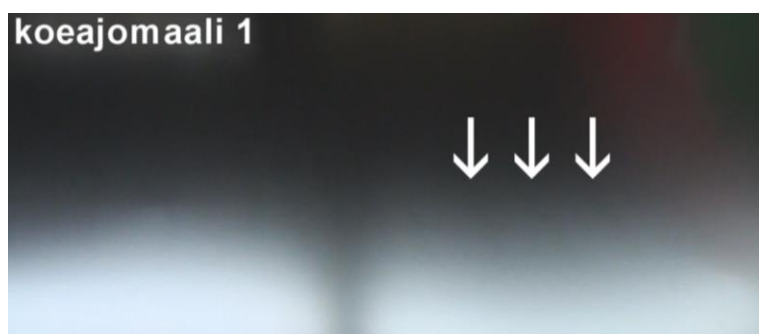
Koeajosyklin telanopeuksien muuttaminen tapahtui melko nopeasti, sillä noin 1100 metrin teräsnauhasta oli mennyt vain 250 metriä, kun telanopeudet olivat jo tasapainoasemassa. ja vain parisataa metriä myöhemmin telanopeudet olivat saavuttaneet loppuaseman.

Kelasta otetusta näytteestä tarkasteltiin raidan esiintymisväliä alusta ja lopusta erikseen. Alusta otetusta näytteestä mitattiin poikittaisen raidan esiintymisväliksi 10 cm välein ja lopusta otetusta näytteestä mitattiin esiintymisväliksi 9,4 cm. Tuotantomaalilla kuiva-kalvon paksuus pidettiin vakiona. Maalin lämpötila maalauksessa nousi 1 asteen 34 °C asteeseen eli käytännössä pysyi vakiona.

7.2 Koeajomaali 1

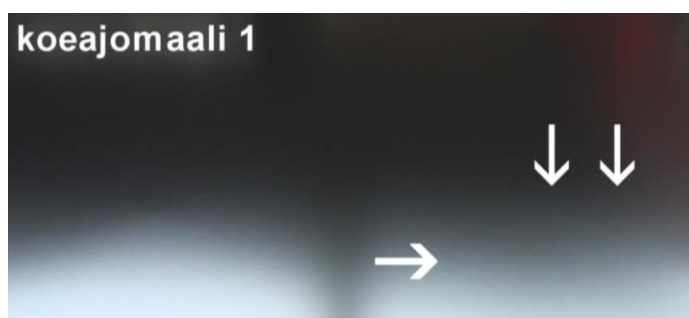
Koeajomaali 1:n ominaisuuksia oli muokattu, mutta kalvonpaksuus tähtäys oli sama kuin tuotantomaalilla. Maalin lämpötila maalauksessa nousi 1 asteen 34 °C asteeseen eli käytännössä pysyi vakiona.

Koeajosityklin alussa suoritettiin samat toimenpiteet kuin referenssiä ajettaessa eli säädettiin kalvonpaksuus kohdalleen ja asetettiin normaalit telanopeudet. Koeajomaali 1 ajettaessa esiintyi poikittaista raitaa koeajosityklin mukaisilla telanopeuksilla maalaustelan nopeuden ollessa korkeampi ja nostotelan nopeuden ollessa matalampi. Kuvassa 34 on esitettynä koeajosityklin alussa esiintyvät poikittaiset raidat.



Kuva 34. Koeajomaali 1 syklin alussa esiintyvät poikittaiset raidat.

Telanopeussuhteiden ollessa yhtä suuret eli nosto- ja maalaustelan nopeuksien ollessa samat muuttui maalaamossa maalattu pinta samettimaiseksi, mutta se ei parantanut pinoittajan tasolla havaittua maalatun nauhan pintaa, vaan siinä esiintyi edelleen poikittaista raitaa, mutta tiheämmin kuin alussa. Koeajomaali 1:llä maalattu lopussa havaittu poikittainen raita on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35. Koeajomaali 1 syklin lopussa esiintyvät poikittaiset raidat ja pitkittäinen raita.

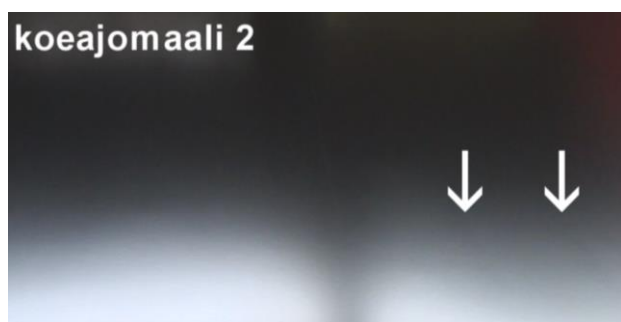
Koeajosityklin lopussa käännettyillä telanopeuksilla alkoi teräsnauhan pinnalla esiintyä poikittaisen raidan lisäksi myös pitkittäistä raitaa koko nauhan leveydellä. Pitkittäinen raita oli selvästi havaittavaa, mutta poikittainen oli lievempää kuin alussa ja keskivaiheilla sykliä. Maalaamossa pinta sitä vastoin näytti erittäin sileältä ja hyvältä.

Koeajosyklin mukaisten telanopeuksien kääntö tapahtui koeajomaalilla 1 enemmän suunnitelman mukaisesti eli loivemmin kuin referenssiä ajettaessa. Telanopeuksien vaihtamisen nopeus ei vaikuta vertailtavuuteen referenssin ja koeajomaali 1 ja 2:n kesken. Koeajomaali 1 ajettaessa poikkiraitaista pintaa esiintyi normaaleilla telanopeuksilla ajettaessa ja käännettyillä telanopeuksilla esiintyi sekä poikittaista että pitkittäistä raitaa koko kelan leveydellä. Kelasta otetusta näytteestä tarkasteltiin raidan esiintymisväliä alusta ja lopusta erikseen. Alusta otetusta näytteestä mitattiin poikittaisen raidan esiintymisväliksi 7,5 cm välein ja lopusta otetusta näytteestä mitattiin esiintymisväliksi 10 cm.

7.3 Koeajomaali 2

Koeajomaali 2:n ominaisuuksia oli muokattu eri tavalla kuin koeajomaali 1:n. Tähtäyskalvonpaksuus oli hieman korkeampi kuin tuotanto ja koeajomaali 1:llä, mutta kuiva-kalvonpaksuus oli sama. Maalin lämpötila maalauksessa nousi 1 asteen 34 °C asteeseen eli käytännössä pysyi vakiona.

Koeajomaali 2 koeajosykli suoritettiin samoin kuin referenssin ja koeajomaali 1 koeajot. Koeajosykli aloitettiin normaaleista telanopeuksista, joilla ajettaessa esiintyi poikittaista raitaa, joka on esitetty kuvassa 36.



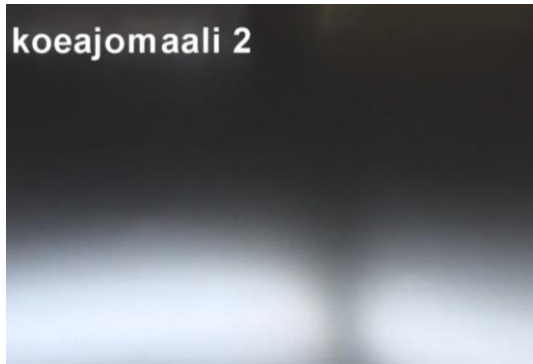
Kuva 36. Koeajomaali 2:n syklin alussa esiintyvät poikittaiset raidat.

Koeajomaali 2:n alusta otetussa kuvassa ja myös myöhemmin tarkastellussa näytteessä näkyivät poikittaiset raidat. Poikittaiset raidat olivat himmeämpiä verrattuna referenssin ja koeajomaali 1:n poikittaisiin raitoihin.

Nosto- ja maalaustelanopeuksien ollessa samat, nauhan pinta oli maalaamossa samettinen, mutta pinnoittajan tasolla poikittaista raitaa ilmeni. Poikittainen raita oli lähtenyt vetäntymään reunoille ja muuttunut malliltaan v-muotoiseksi. Poikittainen raita oli myös muuttunut aaltoilevaksi, enemmän rantaviivakuvioksi, ja lieventynyt voimakkuudeltaan verrattuna koeajosyklin alkuun.

Koesyklin lopussa käännettyillä telanopeuksilla maalaus-koneella nauhan pinta näytti hieman suttuiselta ja eläväiseltä, mutta pinnoittajan tasolla pinta näytti hyvältä eikä poi-

kittaisia raitoja havaittu. Pysäytyskuva koeajovideolta hyvästä pinnasta, jolla ei esiinny poikittaista eikä pitkittäistä raitaa, on esitetty kuvassa 37.



Kuva 37. Koeajomaali 2 syklin lopussa ei esiintynyt erotettavia poikittaisia raitoja.

Koeajomaali 2 ajettaessa poikkiraitaista pintaa esiintyi normaaleilla telanopeuksilla ajettaessa, mutta käännetyillä telanopeuksilla poikittaista raitaa ei enää ilmennyt. Kelasta otetusta näytteestä tarkasteltiin raidan esiintymisväliä alusta ja lopusta erikseen. Alusta otetusta näytteestä mitattiin poikittaisen raidan esiintymisväliksi 8 cm välein ja lopusta otetusta näytteestä ei havaittu tarkastelussa poikittaista raitaa.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITYSEHDOTUKSET

Tämän kappaleen johtopäätökset perustuvat diplomityön aikana suoritettuihin mittauksiin ja koeajoon. Kehitysehdotukset ovat laadittu diplomityön aineiston ja aiemman kehitystyön perusteella.

8.1 Maalaus kone

Maalaus koneet omaavat tällä hetkellä hyvän tuotantokyvyn. Maalarit osaavat säätää tarkasti kalvonpaksuuden kohdalleen ja ongelmatilanteet ovat tiedossa, esimerkiksi milloin telanvaihto on ajankohtainen. Kuitenkin maalaus koneiden säätöalue onnistuneen maalauksen lopputuloksen saavuttamiseksi nykyisillä maaleilla on kapea.

Telojen kunnon seurantaan käytetään vain subjektiivista tuntumaa, joka syntyy telojen pesun yhteydessä maalarille. Myös telahiomossa seurataan runkojen ja telapinnoitteiden kuntoa. Olisikin hyvä kehittää telojen kunnon seuranta mittamalla sitä johdonmukaisesti historiadatan tuottamiseksi, jonka avulla voidaan selvittää telan kestävyys ja kunto.

Savikko omassa diplomityössään tutki eri telamateriaalivaihtoehtoja, kuitenkin päätyen lopputulokseen, että käytössä olevat telat olivat paras vaihtoehto. Uusien parempien telamateriaalivaihtoehtojen etsiminen ja testaaminen tulisi aina olla ajankohtaista, sillä siten voidaan löytää entistä parempia ja tehokkaampia tapoja tuottaa ensiluokkaista maalipinnoitettua terästä. Myös telojen kovuuteen olisi syytä kiinnittää huomiota. Telan suora sylinterimuoto aiheuttaa nykyisin päistä puristaessa maalikalvon ohenemisen reunoille ja keskelle löysemmälle alueelle maalikalvon paksunemisen. Tämän ratkaisemiseksi voisi mahdollisesti harkita kevyttä bombeerausta teloille, jolloin maali levittyisi tasaisemmin kalvonpaksuuden puolesta. Myös telojen liuottimista johtuvan turpoamisen hallinta ja tarkempi analysointi tuottaisi paineiden säätöön tarvittavaa tietoa.

Telojen paineiden säätäminen toimii askelmoottoreilla erinomaisesti. Kalibrointi kuitenkin nollaa niiden paineiden lukematason ja ne eivät toisiinsa verrannollisia kalibroinnin jälkeen. Telojen paineantureiden kalibroinnin johdonmukaisuutta ja menetelmää tulisi kehittää, mikä mahdollistaisi tarkemman ja toistettavamman telapainemittauksen. Tarkempi kalibrointi myös tuottaisi vertailtavaa historiadataa, jota käytettäisiin telapaineiden ja maalaus koneiden säätämisen hallinnan kehittämiseen.

8.2 Koeajo

Pintajännitys vaikuttaa kapillaarilukuun (Ca) kääntäen verrannollisesti eli suurempi pintajännitys pienentää kapillaariluku muiden suureiden ollessa vakiona. Viskositeetin laskun kautta saadaan aikaiseksi matemaattisesti samanlainen tulos eli kapillaari luvun pieneneminen suoraan verrannollisuuden perusteella.

Koeajo oli kokonaisuudessaan onnistunut, mutta kehitettäviä seikkoja löytyi muutama. Koeajojen aikana loppupään nauhavaraaja täyttyi ja sen purkaminen aiheutti nopeuden kiihdytyksen, joka puolestaan häiritsi videokuvauksen onnistumista ja etenkin telanopeuksien muutoksen vaikutuksen havaitsemista nauhan pinnalla olevan virheen voimakkuuteen. Loppupään hidastaminen auttoi havaitsemaan muutoksen ja visuaalisen virheen. Videokuvaus olisi voinut onnistua paremmin paremmilla kuvausvälineillä, sillä nauhan nopeus oli 90 m/min ja se hieman värisi, jolloin fokusointi oli hankalaa. Myös valaistus oli haasteellinen heijastuksen takia. Valaistuksen suunnittelu ja erilaisten valolähteiden käyttäminen parantaisi videokuvauksen onnistumista ja maalipinnan havaitsemista.

8.3 Pitkittäisen raidan syntymisen vähentäminen

Pitkittäisen raidan syntymisen syy on telanopeuksien suhteissa ja liian korkeassa kapillaariluvussa. Kirjallisuusaineiston perusteella voidaan todeta, että telanopeuksien vääränlainen asettaminen johtaa siihen, että teloille syntyy aaltoja, joista muodostuu pitkittäistä raitaa. Oikeiden telanopeuksien ja niiden suhteiden löytäminen vähentäisivät pitkittäistä raitaa.

Pitkittäisen raidan syntymisen yhteydessä korostuu myös kapillaariluvun rooli maalauksessa ja maalin tasoittumisessa uunituksen aikana. Kapillaariluvulle olisikin hyvä löytää tasapaino viskositeetin ja pintajännityksen välillä, sillä niiden vaikutus maalin parempaan virtaamiseen maalauksen aikana tuottaa paremman maalauks jäljen ja tasoittumiseen vaadittava aika lyhenee. Matalammalla viskositeetillä ja pienemmällä kapillaariluvulla olisi positiivinen vaikutus maalauksen onnistumiseen ja pitkittäisen raidan syntymisen vähentämiseen.

8.4 Poikittaisen raidan syntymisen vähentäminen

Poikittaisen raidan syntyminen voi tapahtua siis tutkimusten mukaan telojen värinän aiheuttamana tai meninskin siirtymisestä telojen väliin ja maaliin sekoittuneen ilman seurauksena. Poikittainen raita voidaan tuntea englanninkielisillä termeillä *chatter*, jota käytetään nimityksenä värinästä, tai *cascade* tai *seashore pattern*, joita käytetään aaltoilevat reunat omaavasta poikittaisesta raidasta.

Telojen värinä voi johtua telojen venähtämisestä tai muusta telavirheestä, joka tekee siitä epäkeskon ja saa aikaan nauhaa tai telaa merkkäavan liikkeen, joka ilmenee poikittaisena raitana. Tällainen poikittainen raita on usein suora ja sillä on selkeät reunat. Myös Chandio et al. esittää värinän aiheuttavan poikittaisen raidan, mutta meninskin aiheuttama paineen vaihtelu on Chandio et al. mukaan syy värinään. Telojen paineiden laajempi mittaus, kunnon jatkuvatoiminen valvonta ja värinän mittaus voisivat olla toimenpiteitä, joilla voidaan joko todentaa epäkesko pyöriminen tai oskilloivan liikkeen syntyminen, ja tai sulkea pois poikittaisen raidan muodostuminen värinän seurauksena.

Coyle et al, Judin ja Balzarotti et al. ovat päätyneet tutkimuksissaan siihen, että poikittainen raita syntyy telanopeuksien suhteen ollessa väärin asetettu tai kapillaariluvun ollessa liian korkea tai niiden yhteisvaikutuksesta. Tähän ovat myös Sipilä ja Pynnönen päätyneet raporteissaan. Tämän diplomityön koeajon perusteella siinä ilmennyt poikittainen raita on enemmän *cascade* -tyyppistä poikkiraitaa.

Koeajossa syntyi poikittaista raitaa referenssiin sekä molempiin koeajomaaleihin normaaleilla telanopeuksilla, mutta käännettyillä telanopeuksilla ja koeajomaali 2:lla kyettiin maalaamaan hyvää maalipintaa, jossa ei ilmennyt poikittaista raitaa. Poikittaista raitaa esiintyi näytteissä 7,5–10 cm esiintymisvälillä, mikä viittaisi siihen, että sitä syntyy tietyssä telavälin muodostamassa nipissä. Käänteiset telanopeudet saivat aikaan, että nostotela nostaa tarpeeksi maalia mittatelan mitattavaksi ja nostotela tuo tarpeeksi maalia maalaustelalle, joten vain oikea kalvonpaksuuden verran siirtyy teräsnauhan pinnalle maalaustelalta.

Koeajon perusteella poikittainen raita ei voi syntyä vain maalaus koneen telojen aiheuttamasta värinästä, sillä korkeamman pintajännityksen omaavalla koeajomaali 2:lla ja käännettyillä telanopeuksilla onnistuttiin tuottamaan virheetöntä maalipintaa. Maalin ominaisuuksia muuttamalla voitaisiin saattaa maalauksen vakautta kuvaava kapillaariluku tasapainoon, ja löytää virheettömän maalipinnan tuottamisen mahdollistava kapillaariluku.

8.5 Maalaustapahtuman lämpötilan hallinta

Koeajon perusteella ja yleisen kokemuksen perusteella maalauksen lämpötilan hallinta on kelvollisella tasolla, sillä joukko käytäntöjä ennen maalauksen aloittamista lämmittää ja valmistele maalin sopivaksi ennen varsinaista telamaalausta.

Pohjamaalin lämmittäminen lämmönvaihtimien avulla on parantanut pohjamaalauksen onnistumista merkittävästi, koska maalin lämpötilaa ja sitä kautta viskositeettia on voitu hallita paremmin. Lämpötilan nostaminen alentaa viskositeettia, mikä taas parantaa maalattavuutta, ja lämmönvaihtimen avulla voidaan säätää maalin lämpötilaa ja säilyttää se vakiona koko maalauksen ajan.

Maalauksen aikana telojen lämpötila voi nousta pyörimisestä aiheutuvan kitkan vaikutuksesta, mutta lämpötilan nousu usein tapahtuu pitkien ajojen aikana. Telojen lämpötilan noustessa niihin imeytyy enemmän liuotinta, joka aiheuttaa telojen turpoamista, joka taas johtaa suurempiin puristusvoimiin telojen välillä samoilla puristusasetuksilla ja kehänopeuden muuttumiseen. Nämä molemmat seuraukset vaikuttavat suoraan maalauksen onnistumiseen sekä kalvonpaksuuden hallintaan.

Maalauksen lämpötilaan vaikuttaa myös tulevan teräsnauhan lämpötila. Pohjamaalaukseen saapuvan nauhan lämpötilaan vaikuttaa varastointilämpötila ja esikäsitellyssä saavutettu lämpötilan muutos. Pohjamaaliuunin jälkeinen vesijäähdytys yhdessä maalipinnoituslinjan ilman lämpötilan kanssa vaikuttavat pintamaalaukseen saapuvan nauhan lämpötilaan. Maalaukseen tulevan teräsnauhan lämpötilan vaikutusta telojen ja maalin lämpötilaan ei ole systemaattisesti tutkittu ja analysoitu sen vaikutusta maalauksen onnistumiseen.

8.6 Suurnopeuskuvaus

Suurnopeuskuvaus oli tarkoitus suorittaa tämän diplomityön yhteydessä, mutta haasteeksi muodostuivat maalaamon luokittelu ATEX-tilaksi. ATEX-tilalla tarkoitetaan tilaa, jossa on läsnä helposti syttyviä kaasuja tai pölyä, jotka voivat aiheuttaa syttyessään räjähdysen. ATEX-tilaan voi viedä vain ATEX-suojauksen omaavia elektroniikkalaitteita tai ATEX-luokitellussa koteloon sijoitettuja elektronisia laitteita. Elektronisissa laitteissa olevat virtapiirit voivat aiheuttaa kipinän oikosulun sattuessa, minkä takia niitä ei suositella käytettäväksi ATEX-tiloissa ilman suojausta. Kotelon tai muun mahdollisen ratkaisun esimerkiksi peilien käyttäminen kuvauksen apuna olisi hyvä tutkia uudestaan tulevaisuudessa.

Suurnopeuskuvauksella voitaisiin tutkia maalin käyttäytyminen teloilla ja nähdä mahdollisesti raitojen muodostuminen niiden alkulähteillä. Esimerkiksi Kobayashi on käyttänyt suurnopeuskuvausta tutkimuksensa apuna todentaessaan pitkittäisten raitojen syntymistä eri telanopeuksilla ja kapillaariluvuilla. Kobayashi sijoitti suurnopeuskameran kuvaamaan maalaustelan ja teräsnauhan välistä nippiä tutkimuksessaan.

Maalamo ja maalaus kone asettavat ATEX-tilan lisäksi haasteita suurnopeuskuvaukselle. Tilat maalaus koneen ympärillä ja etenkin sivuilla ovat ahtaat ja riippuen siitä, mitä tela nippiä halutaan tutkia, voi kameran koko asettaa rajoituksia. Myös tapa ja kuvaus kulma, miten halutaan tutkia maalin virtausta teloilla, tulee ratkaista. Esimerkiksi, jos halutaan tutkia yksittäisen maalipisaran käyttäytymistä teloilla, on syytä valita suuri kontrasti värien välille: musta pisara valkoisen maalauksen yhteydessä.

8.7 FEM ja CFD mallien rakentaminen

Maalauksen tutkiminen FEM-mallin avulla voisi olla hyödyllistä, sillä se ei vaatisi koeajojen järjestämistä ja sitä kautta olisi myös edullista. Kuitenkin Hämeenlinnan maali-pinnoituslinjan telamaalaukseen pohjautuvan tarkan FEM-mallin rakentaminen olisi melko mittava hanke, mutta avartaisi mahdollisuuksia erilaisten kokeiden suorittamiseen ilman tuotannon häiriintymistä.

Erityisesti FEM-mallinnus sopii meninskin muodon ja sijainnin tutkimiseen. Parametrien määrittely maalien, telanopeuksien ja telamateriaalien suhteen olisi tosin haasteellista tarkan FEM-analyysin suorittamiseksi. Kuitenkin edellä mainittujen parametrien ollessa mahdollista liittää FEM-malliin, olisi myös mahdollista simuloida maalausta CFD-mallinnuksen avulla. CFD-mallinnuksen etuna FEM-malliin on kokoaikainen ja jatkuvasti muuttuvan virtauksen huomioon ottaminen, mikä ei ole mahdollista FEM-mallissa. CFD-mallinnus voisi mahdollistaa jopa uusien maalien käyttäytymisen ennustamisen telamaalauksen osalta, jos niiden tarkat ominaisuudet ovat tiedossa.

8.8 Kapillaarilukujen ja telanopeuksien määrittäminen maaleille

Kirjallisuuden ja koeajon perusteella maalien kapillaariluku on merkityksellinen tekijä maalauksen onnistumista arvioitaessa ja sen tulisi määrittää kaikista käytettävistä maaleista. Ensimmäiseksi kapillaariluvun määrittäminen tulisi tehdä sellaisille maaleille, joiden maalauksessa syntyy herkästi virheitä.

Kapillaarilukujen määrittämiseksi maaleista tulee mitata viskositeetti ja pintajännitys. Kuten tässä työssä on osoitettu, nämä ominaisuudet vaihtelevat värikohtaisesti ja myös hieman eräkohtaisesti, siksi onkin tärkeää määrittää laajasta joukosta maaleja kapillaariluvut. Kapillaariluku tulisi määrittää maalauksen lämpötilassa, sillä molemmat viskositeetti sekä pintajännitys ovat riippuvaisia lämpötilasta.

Myös telanopeuksien ja niiden optimaaliset suhteet tulisi määrittää pinnoite ja värikohtaisesti. Telanopeuksien ja kapillaarilukujen yhdistäminen ja virheettömän maalauksen alueen löytäminen vaatisi suuren joukon koeajoja. CFD-mallinnuksen avulla voisi olla mahdollista simuloida maalien käyttäytyminen ilman varsinaista koeajoa ainakin raitojen syntymisen suhteen, mutta myös muiden telamaalauksesta syntyvien virheiden.

8.9 Sinkki 3 – linjan ChemCoaterin kehitys

Sinkki 3 – linjalla käytetään telamaalausta (ChemCoater) ohuen maalikalvon levittämiseksi metallipinnoitetun teräsnauhan passivoimiseksi. ChemCoater levittää vesipohjaisia maaleja, mutta tässä työssä esitetyt teoriat ja löydökset ovat sovellettaessa myös niihin. Joten myös ChemCoaterilla syntyvien raitojen vähentäminen on mahdollista optimaalisten kapillaarilukujen ja telanopeuksien määrittämisellä.

9. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tiedon ja osaamisen parantaminen kolmitelamaalauksen suhteen SSAB:n Hämeenlinnan maalipinnoitustehtaalla. Perusteina tälle diplomityölle olivat: maalauksen laadun parantaminen telamaalauksoneella, maalaustapah-tuman hallinnan parantaminen ja tehokkuuden parantaminen kustannussäästön kautta. Diplomityön aihe rajattiin käsittelemään erityisesti telamaalausta ja siihen liittyviä ilmi-öitä sekä maalien ominaisuuksia.

SSAB:n Hämeenlinnan ohutlevytehtaan kylmävalssattuja ja metallipinnoitettuja tuotteita jatkjalostetaan maalipinnoituslinjalla maalaamalla ne liuotinpohjaisia polyesteri-, PVdF- ja polyuretaanipohjaisia maaleja käyttämällä. Maalit levitetään teräsnauhan pin-nalle käyttämällä kolmitelamaalaukskonetta, joka koostuu karkeasti kovakromatusta nos-totelasta, polymeeripintaisista mitta- ja maalaustelasta.

Telamaalausta ja siinä tapahtuvia ilmiöitä voidaan selittää ja mallintaa virtausdynaami-kan teorian ja erityisesti Navier-Stokes yhtälöiden avulla, mutta myös voiteluteorian avulla maalauksen mallintaminen laajentaa perspektiiviä. Näiden teorioiden avulla voi-daan telamaalauksesta luoda FEM-malleja ja CFD-mallinnusta, joiden avulla on mah-dollista tutkia sen ilmiöitä. Esimerkiksi meninskin ilmentymistä ja merkitystä on tutkittu laajasti FEM-mallien avulla ja onnistuttu luomaan käsitys sen muodostumisesta tela-malauksessa.

Pitkittäisen raidan syntymisen syy on telanopeuksien suhteissa ja liian korkeassa kapil-laariluvussa. Kirjallisuusaineiston perusteella voidaan todeta, että telanopeuksien vää-ränlainen asettaminen johtaa siihen, että teloille syntyy aaltoja, joista muodostuu pitkit-täistä raitaa. Oikeiden telanopeuksien ja niiden suhteiden löytäminen vähentäisivät pit-kittäistä raitaa. Myös kapillaariluvun alentaminen viskositeetin pienentämisen kautta auttaisi ehkäisemään pitkittäistä raitaa.

Tässä työssä käsitelty poikittainen raita syntyy meninskin siirtymisestä telojen väliin väärin asetettujen telanopeuksien seurauksena ja maalin kapillaariluvun liian korkeasta arvosta. Telanopeuksien ollessa suuret ja meninski siirtyy maalin puutteen seurauksena syvemmälle nippiin ja maaliin sekoittuu ilmaa, mikä aiheuttaa poikittaisen raidan syn-tymisen teräsnauhan pinnalla. Kapillaariluvun alentaminen parantaisi maalin virtausta teloilla maalauksen aikana ja säilyttäisi meninskin paremmin oikeassa asemassa.

Diplomityön koeajo suoritettiin ominaisuuksiltaan muokatuilla mustan polyesterin maa-
lierillä, joita ajettiin koeajosyklin mukaisesti. Koeajosykli suunniteltiin siten, että se käy
läpi tällä hetkellä käytössä olevat telanopeusasetukset. Maalin pintajännitystä nostettiin
samalla säilyttäen muut ominaisuudet vakioina. Koeajon tuloksena tukivat kirjallisuus-
dessa esitettyjä keinoja, jotka vähentävät poikkiraidan syntymistä ja tuottavat virheet-
tömän maalipinnan.

Kehitysehdotukset kohdistuivat maalaus koneen telojen laajempaan mittaamiseen, maa-
lin lämpötilan hallinnan parantamiseen lämmönvaihtimen avulla, suurnopeuskuvauksen
avulla maalauksen tutkimiseen ja maalauksesta tietokoneella rakennettaviin malleihin ja
maalauksen simulointiin. Myös koeajon perusteella syvällisempää kapillaarilukujen ja
telanopeuksien tutkimista maaleille suositeltiin tässä diplomityössä.

LÄHTEET

- [1] SSAB, Vuosikertomus 2014, 2015.
- [2] SSAB Europe, Yleisesitys, 2015.
- [3] SSAB, SSAB Europe Hämeenlinnan tehdas, esittely, 2014.
- [4] SSAB, SSAB Europe Hämeenlinnan tehdas, maalauslinjan esittely, 2015.
- [5] Suositellut teräkset polyesteripinnoitteille. Saatavissa: <http://www.ssab.fi/Products/Brands/GreenCoat/Products/Polyester#!di=discover9D72F48DF4EA4D8C954891EA7CD1B958>
- [6] Ruukki Metals, Colour Coated Steels, yleisesittely, 2012.
- [7] Ruukki Academy, Color Coated: Selecting the right type of coating, sisäinen koulutus, 2011.
- [8] J. Sander, Coil coating. Vincentz Network, Hanover, Germany, 2014.
- [9] Corus Special Strip, 100 Jahre Trierer Walzwerk. Saatavissa: http://www.igmetall-trier.de/uploads/tx_mpcontent/100_Jahre_Trierer_Walzwerk.pdf
- [10] C. Münch, Process and apparatus for applying solutions, US 1847065 A, 23.05.1928, (28.2.1932).
- [11] J.L. Hunter, Apparatus for coating strip material, US 2365761 A, 10.10.1939, (26.12.1944).
- [12] Paint & Coatings Industry, 90 Years with PCI: A Retrospective In the 1930s Coil Coating Springs into View. Saatavissa: <http://www.pcimag.com/articles/84454-90-years-with-pci-a-retrospective-br-in-the-1930s-coil-coating-springs-into-view>
- [13] J-M. Lehtonen, Optimization of the first coating layer on TOC-based coil coatings, diplomityö, Tampereen Teknillinen yliopisto, 2015.
- [14] SSAB Hämeenlinnan maalipinnoituslinja, Kahden pumpun käyttö liuotinmaaleilla, työohje.
- [15] A. Pynnönen, Telamaalaus, sisäinen raportti, 2006.
- [16] E. Thuneberg, Hydrodynamiikka, luentomateriaali, Oulun yliopisto, Fysiikan laitos, 2011.

- [17] M.T. Schobeiri, Fluid Mechanics for Engineers, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [18] R.L. Panton, Incompressible Flow, John Wiley & Sons, 4. painos, 2013.
- [19] S. Alonso, O. Reglat, F. Bertrand, L. Choplin, P.A. Tanguy, Process viscosity in reverse roll coating, Trans IChem, Vol. 79, osa A, 2001.
- [20] D.J. Coyle, C. W. Macosko, L. E. Scriven, The Fluid Dynamics of Reverse Roll Coating, AIChE Journal, helmikuu 1990 Vol. 36, No. 2. s.161-174.
- [21] F. Belblidia, H.R. Tamaddon-Jahromi, S.O.S. Echendu, M.F. Webster, Reverse roll-coating flow: a computational investigation towards high-speed defect free coating, Mech Time-Depend Mater (2013) 17, s.557–579.
- [22] M. Sasaki, M. Miyake, N. Nakata, Visualization Study of Flow Stability in Reverse Roll Coating, ISIJ International, Vol. 55 (2015) No. 4, s. 863-869.
- [23] H. Savikko, Maalauksen laadun kehittäminen teräsnauhan maalipinnoituksessa, diplomityö, Tampereen Teknillinen yliopisto, 2003.
- [24] A-P. Jaatinen, Haastattelu, kesäkuu, 2015.
- [25] SSAB Hämeenlinnan maalipinnoituslinja, Telahionta, työohje.
- [26] SSAB Hämeenlinnan maalipinnoituslinja, Maalaustelojen vaihto ja tarkistus työohje.
- [27] K. Kivihaka, Paksun sinkkipinnoitteen maalattavuus ja ominaisuudet maalipinnoitettuna, 2014.
- [28] V. Pejakovic, R. Jisa, F. Franek, Abrasion resistance of selected commercially available polymer materials, TRIBOLOGIA – Finnish Journal of Tribology 1 vol 33/2015, s. 21-27.
- [29] SSAB Hämeenlinnan maalipinnoituslinja, Telanopeuksien asetus, työohje.
- [30] M. Judin, Telamaalausvirheiden syntyminen ja niiden vähentämismahdollisuudet, sisäinen raportti, 1999.
- [31] SSAB Hämeenlinnan maalipinnoituslinja, Vaativien pinnoitteiden maalaaminen, työohje.
- [32] H. Kobayashi, Visualization study of liquid surface stability for full reverse 3-roll coater with rigid gravure roll, 16th International Coating Science and Technology Symposium, Atlanta 2012.

- [33] F. Varela Lopez, M. Rosen, Rheological Effects in Roll Coating of Paints, Latin American Applied Research 32 (2002), s. 247-252.
- [34] J.W. Gooch, Encyclopedic Dictionary of Polymers, Springer, 2011.
- [35] The Aluminum Association, Visual Quality Characteristics of Aluminum Sheet and Plate. Saatavissa: <http://www.aluminum.org/sites/default/files/VisualQualityCharacteristicsSheet%26Plate.pdf>
- [36] National Coil Coating Association, Toolkit 9: Coil Coating Glossary, technical bulletin 1.1.1, 2005.
- [37] M.S. Chandio, M.F. Webster, Numerical simulation for viscous free-surface flows for reverse roller-coating, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, Vol. 12 No. 4, 2002, s. 434-457.
- [38] F. Balzarotti, M. Rosen, Systematic Study of Coating Systems with Two Rotating Rolls, Latin American Applied Research 39:99-104, 2009.
- [39] R. Sipilä, Telamaalaus ja maalin kovetus, Rautaruukki Steel, Sisäinen Raportti, 2002
- [40] P.A. Schweitzer, Paint and coatings: applications and corrosion resistance, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
- [41] A.A. Tracton, Coatings technology : fundamentals, testing, and processing techniques, CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.
- [42] Valspar, Jari Haaksluoto ja Kimmo Saramäki, tehdasvierailu ja kokous, lokakuu 2015.
- [43] R. Talbert, Paint Technology Handbook, CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.
- [44] Z.W. Wicks, F.N. Jones, S.P. Pappas, D.A. Wicks, Organic coatings: science and technology, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, Yhdysvallat, 2007.
- [45] Valspar, J. Haaksluoto ja K. Saramäki, kokous, joulukuu 2015.
- [46] AFCONA, Products for Coil Coating, esite. Saatavissa: <http://www.afcona.com.my/entAttchDL.php?iID=240>
- [47] J.V. Koleske, Paint and Coating Testing Manual, ASTM International, 15. Painos, 2012.

- [48] Pintajännitys, Biolin Scientific. Saatavissa:
http://www.biolinscientific.com/zafepress.php?url=/images/Attension/Illustration%20%26%20Graphs/Surface%20tension/AT_SurfaceTensionIllustration.jpg
- [49] R.A. Ryntz, P.V. Yaneff, Coatings of Polymers and Plastics, Marcel Dekker Inc., 2003.
- [50] J. Ahokas, Viskometrikuvat, sisäinen esitys.
- [51] Top Analytica, KSV CAM 200 –laitteisto. Saatavissa:
<http://www.topanalytica.com/fi/tutkimuspalvelut/kastumiskulmalaitteisto>
- [52] KSV Instruments Ltd, CAM 200, esite.